



Rui Manuel
Trindade Martins

Misturas Betuminosas com borracha – Adesividade
ligante-agregado



**Rui Manuel
Trindade Martins**

**Misturas Betuminosas com borracha – Adesividade
ligante-agregado**

Nº. Mec. 43822

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof.^a Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada,
Universidade de Aveiro

Prof.^a Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia, Professora Adjunta, Instituto
Politécnico de Castelo Branco

Prof.^o Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor
Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de expressar aqui a minha profunda gratidão a todos os que de alguma forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento desta investigação;

Um agradecimento especial ao Prof. Dr.º Agostinho Benta por toda a disponibilidade e apoio que sempre me prestou, e pela prontidão com que sempre se apresentou na resolução de qualquer problema;

Aos Engenheiros Luís Barbosa e Luís Silva, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pelo enorme apoio, acompanhamento, disponibilidade e gosto pela área que me incutiram.

À Engenheira Maria Carlos e aos Técnicos do laboratório do Departamento de Engenharia Civil, em particular ao Sr. Vítor Rodrigues por todo o esclarecimento, disponibilidade e vontade de trabalhar que demonstraram nesta investigação.

Ao Departamento de Engenharia Civil um agradecimento especial, por disponibilizar todas as condições possíveis, a mim e aos meus colegas.

Um muito obrigado à empresa Rosas Construtores, S.A. por disponibilizarem os materiais necessários para esta dissertação.

Agradeço aqui a todos os meus amigos que me apoiaram e ajudaram nesta etapa da minha vida, e também por todos os momentos de felicidade que me proporcionaram. Jamais esquecerei os anos passados com eles nesta instituição. Agradeço em especial ao André Lourenço, Beatriz Martins, David Lourenço, Diogo Limas, Filipe Soares, Izidro Alves, Maria Matos, Rui Maio, e em especial, pela ajuda prestada na execução dos provetes, à Filipa Rodrigues.

Não podia ficar sem deixar aqui um obrigado do fundo do coração aos meus amigos de todo o sempre, Francisca Magalhães e João Moura, por todo o apoio incondicional que me deram.

Por fim, agradeço aos meus familiares, em especial aos meus pais, por todo o apoio, sacrifício e dedicação que tiveram em mim. E a minha namorada agradeço por toda a paciência, amor e carinho que sempre me deu.

palavras-chave

Misturas betuminosas, Betume modificado com borracha (BMB), Agregados, Adesividade, Seixo

resumo

Os pneus usados são sem dúvida uma das maiores fontes de poluição do nosso planeta, não sendo conhecido o tempo de degradação do mesmo no meio ambiente. Os pneus são e sempre foram uma das problemáticas ambientais mais discutidas no seio da comunidade científica, que sempre estudou maneiras de reaproveitar as matérias-primas existentes no pneu.

Ao longo dos anos foram vários os estudos que se focaram na possibilidade de incorporar borracha em misturas betuminosas, por forma a melhorar o comportamento das mesmas. Esses estudos revelaram-se bastante positivos demonstrando que a borracha melhora significativamente as propriedades das misturas.

O fraco conhecimento sobre a forma como o betume modificado com borracha, ou a borracha propriamente dita vai interagir com os diferentes agregados, é um entrave para o dimensionamento de pavimentos com este tipo de misturas. Esta dissertação propõe o estudo do comportamento destas misturas quando formuladas com agregados de baixa adesividade. Isto para perceber até que ponto a borracha pode vir a substituir determinados aditivos químicos e orgânicos aquando da necessidade dos mesmos para melhorar o comportamento das misturas.

Para iniciar o estudo experimental, foi escolhido um agregado de baixa adesividade, com o qual foram feitas várias formulações com e sem borracha, por forma a comparar o possível melhoramento das mesmas com o uso da borracha. Esta comparação foi essencialmente focada na adesividade do agregado perante a adição da borracha.

key words

Bituminous mixtures, Asphalt rubber (AR), Aggregates, Adhesivity, Pebble

abstract

Used tires are surely a major cause of pollution in our planet, and the time they take to degrade in the environment is not yet known. This is one of the most discussed environmental issues within the scientific community, which has been studying ways to reuse the raw materials of tires.

Over the years, several studies have made the possibility of adding rubber to bituminous mixtures a focus of attention, so as to improve their behaviour. Those studies proved to be very positive, showing that rubber significantly improves the properties of mixtures.

The poor knowledge of how the rubber modified bitumen, or the rubber itself, will interact with different aggregates is an obstacle to sizing pavements with this type of mixtures.

This dissertation aims to show the behavior of these mixtures when formulated with aggregates with low adhesiveness, in order to explore the extent to which rubber might replace certain chemical and organic additives, when they're needed to improve the behavior of mixtures.

An aggregate with low adhesiveness was chosen for the experimental study, wherewith several formulations were made with and without rubber, in order to compare their possible improvement with the use of rubber. This comparison was mainly focused on the adhesiveness of the aggregate before the addition of the rubber.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Índice de Equações	vii
Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações	ix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Organização	3
2. Misturas Betuminosas com Adição de Borracha.....	5
2.1. Conceitos Gerais.....	5
2.2. Breve história da utilização de Misturas betuminosas com adição de borracha	7
2.3. Materiais para BMB	8
2.3.1. Betume.....	8
2.3.2. Granulado de Borracha.....	11
2.4. Misturas betuminosas por via húmida – BMB	13
2.5. Misturas betuminosas por via seca	17
2.6. Ligação Betume-Borracha.....	20
2.7. Adesividade do Inerte	23
3. Estudo Realizado	27
3.1. Considerações iniciais	27
3.2. Diferentes tipos de agregados.....	27
3.3. Metodologia dos Trabalhos	30
3.3.1. Análise Granulométrica.....	31
3.3.2. Massas Volúmicas	35
3.3.3. Formulações de estudo	37
3.3.4. Teor de Betume	38
3.3.5. Resistência Conservada e Suscetibilidade à Água	39
3.3.6. Adesividade betume-agregado	45
4. Análise dos Resultados dos Ensaios.....	51
4.1. Análise dos resultados dos ensaios de Resistência Conservada e de Sensibilidade à água	51
4.2. Resultados e análise dos ensaios de Adesividade betume-agregado.....	61
5. Conclusões Finais	71
5.1. Estudos futuros	72
6. Referências	73
7. ANEXOS.....	i
7.1. ANEXO I (Análises Granulométricas).....	i
7.2. ANEXO II (Massas Volúmicas e Absorção de Água)	ix

Índice de Figuras

Figura 1 - Depósito de pneus em Westley, California, USA (Fonte: Burtynsky (1999))	5
Figura 2 - Incêndio de pneus (Fonte: Araújo (2009)).....	11
Figura 3 - Aplicações finais do granulado de pneus reciclados (Valorpneu, 2012).....	12
Figura 4 - Granulado de borracha (Fonte: Ivson (2007))	13
Figura 5 - Fabrico por via húmida (Fonte: Neto et al. (2006)).....	14
Figura 6 - Camião preparado para fabrico de BMB, sistema <i>continuous blend</i> (Fonte: CEI-interprises (2012a)).....	15
Figura 7 - Central de fabrico de betume, sistema <i>terminal blend</i> (Fonte: CEI-interprises (2012b))	15
Figura 8 - Fabrico por via seca (Fonte: Neto et al. (2006))	18
Figura 9 - Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha e o betume convencional (Fonte: Holleran and Reed (2000))	22
Figura 10 - Efeito do tempo de digestão na viscosidade do betume-borracha. (Fontes, 2009)	22
Figura 11 - Pó de pedra (foto do autor)	30
Figura 12 - Godo 4/11 (foto do autor)	30
Figura 13 - Godo 11/16 (foto do autor)	30
Figura 14 - Cal hidráulica (Filler) (foto do autor)	30
Figura 15 - Peneiro de rede metálica e de chapa perfurada (foto do autor).....	32
Figura 16 - Curva granulométrica da formulação e fuso adotado	33
Figura 17 - Granulado de borracha usado (foto do autor)	34
Figura 18 - Curva granulométrica correspondente à formulação a usar para uso da Formula de Duriez	39
Figura 19 - Mistura de agregados para produção de provete de ensaio (foto do autor)	40
Figura 20 - Adição de betume à mistura (foto do autor)	40
Figura 21 - Misturadora (foto do autor).....	41
Figura 22 - Máquina de compactação (foto do autor)	41
Figura 23 - Desmolde do provete (foto do autor).....	41
Figura 24 - Provetes produzidos (foto do autor).....	41
Figura 25 - Máquina de compressão pronta para ensaio (foto do autor)	42
Figura 26 - Pesagem provete seco (foto do autor).....	42
Figura 27 - Pesagem provete imerso (foto do autor)	42
Figura 28 - Provetes para ensaio de Resistência Conservada (foto do autor)	43
Figura 29 - Provetes em banho-maria a 60°C (foto do autor)	44
Figura 30 - Proporções granulométricas brita 6/12	47
Figura 31 - Proporções granulométricas Seixo 4/11	47
Figura 32 - Proporções granulométricas Seixo 11/16	47
Figura 33 - Misturas cobertas com água destilada (foto do autor)	48
Figura 34 - Força de Rotura das formulações em 30 min de banho-maria	58
Figura 35 - Deformação das formulações em 30 min de banho-maria	58
Figura 36 - Força de Rotura das formulações em 24h de banho-maria.....	59
Figura 37 - Deformação das formulações em 24h de banho-maria.....	59
Figura 38 - Índice de Resistência Conservada das formulações	59
Figura 39 - Gráfico Força de Rotura ao longo do tempo de desgaste pela ação da água a 60°C	60
Figura 40 - Brita Granítica após 24h em água destilada (foto do autor)	63
Figura 41 - Brita Granítica após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	63

Figura 42 - Brita Granítica com 10% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)	63
Figura 43 - Brita Granítica com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	64
Figura 44 - Brita Granítica com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)	64
Figura 45 - Brita Granítica com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	64
Figura 46 - Seixo 4/11 após 24h em água destilada (foto do autor).....	65
Figura 47 - Seixo 4/11 após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	65
Figura 48 - Seixo 4/11 com 10% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor).....	65
Figura 49 - Seixo 4/11 com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	66
Figura 50 - Seixo 4/11 com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor).....	66
Figura 51 - Seixo 4/11 com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	66
Figura 52 - Seixo 11/16 após 24h em água destilada (foto do autor).....	67
Figura 53 - Seixo 11/16 após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	67
Figura 54 - Seixo 11/16 com 10% de borracha após 24 em água destilada (foto do autor).....	67
Figura 55 - Seixo 11/16 com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	68
Figura 56 - Seixo 11/16 com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)...	68
Figura 57 - Seixo 11/16 com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor).....	68

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Acumulação anual de pneus usados nos países da União Europeia. (Vicente, 2006)	6
Tabela 2 - Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (EP, 2012)	9
Tabela 3 - Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego (Takallou & Hicks, 1988)	18
Tabela 4 - Especificações para a granulometria de borracha (Takallou & Hicks, 1988)	19
Tabela 5 - Fusos granulométricos específicos para a borracha em alguns estados americanos (Specht, 2004)	23
Tabela 6 - Classificação de rochas quanto à acidez e ao teor de sílica (Bernucci et al., 2008)	25
Tabela 7 - Distribuição dos centros de produção abrangidos pela natureza da matéria-prima utilizada na produção dos seus produtos (InIR, 2009b)	28
Tabela 8 - Propriedades dos agregados que afetam as misturas betuminosas (Fontes, 2009)	29
Tabela 9 - Normas utilizadas para as propriedades dos agregados	31
Tabela 10 - Dimensão nominal da abertura dos peneiros de malha quadrada	32
Tabela 11 - Formulação de Seixo	33
Tabela 12 - Fuso granulométrico do granulado de borracha (EP, 2012)	34
Tabela 13 - Resultados do ensaio de determinação da massa volúmica para o pó de pedra	36
Tabela 14 - Resultados do ensaio de determinação da massa volúmica para o Seixo 4/11	36
Tabela 15 - Resultados do ensaio de determinação de massa volúmica para o Seixo 11/16	37
Tabela 16 - Formulações de misturas betuminosas para estudo	37
Tabela 17 - Grupos de misturas em estudo	38
Tabela 18 - Teor de betume para a formulação de Seixo	39
Tabela 19 - Identificação e distribuição dos provetes pelos ensaios	44
Tabela 20 - Peso da amostra no ensaio (J.A.E, 1953)	45
Tabela 21 - Quantidades para ensaio de adesividade betume-inerte	48
Tabela 22 - Composições de ensaio à adesividade betume-agregado	49
Tabela 23 - Características da formulação sem borracha (30min)	52
Tabela 24 - Características da formulação com 10% de borracha (30min)	52
Tabela 25 - Características da formulação com 20% de borracha (30min)	53
Tabela 26 - Características da formulação sem borracha (24h)	53
Tabela 27 - Características da formulação com 10% de borracha (24h)	54
Tabela 28 - Características da formulação com 20% de borracha (24h)	54
Tabela 29 - Características da formulação sem borracha (48h)	55
Tabela 30 - Características da formulação com 10% de borracha (48h)	55
Tabela 31 - Características da formulação com 20% de borracha (48h)	56
Tabela 32 - Características da formulação sem borracha (72h)	56
Tabela 33 - Características da formulação com 10% de borracha (72h)	57
Tabela 34 - Características da formulação com 20% de borracha (72h)	57
Tabela 35 - Resultados de resistência conservada para as formulações de seixo	58
Tabela 36 - Médias das forças de rotura dos provetes de 48h e 72h em banho-maria	60

Índice de Equações

Equação 1 – Massa volúmica do material impermeável das partículas	35
Equação 2 – Massa volúmica das partículas secas em estufa.....	36
Equação 3 – Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca	36
Equação 4 – Absorção de água.....	36
Equação 5 – Fórmula de <i>Duriez</i>	38
Equação 6 – Superfície específica (Fórmula de <i>Duriez</i>)	38
Equação 7 – Superfície específica (Ensaio Adesividade ligante-agregado).....	46
Equação 8 – Peso do betume (Ensaio Adesividade ligante-agregado).....	46
Equação 9 – Índice de Resistência Conservada.....	51

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

°C – Graus Celsius;

°C/min – Graus Celsius por minuto;

% – Percentagem;

Σ – Superfície específica do agregado;

μm – Micrómetro;

ρ_a – Massa Volúmica do material impermeável das partículas;

ρ_{rd} – Massa Volúmica das partículas secas em estufa;

ρ_{ssd} – Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca;

ρ_w – Massa volúmica da água;

ABR – Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus;

AR – *Asphalt Rubber*;

BMB – Betume Modificado de Borracha;

CEN – *Comité Européen de Normalisation*;

CRM – *Crumb Rubber Modifier*;

cm – Centímetro;

DEC-UA – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro;

EN – Norma Europeia;

E.N – Estrada Nacional;

E.P. – Estradas de Portugal;

FHWA – *Federal Highway Administration*;

g – Grama;

g/cm^3 – Gramas por centímetro cubico;

h – Hora;

hab – Habitante;

InIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP;

IRC – Índice de Resistência Conservada;

J.A.E – Junta Autónoma das Estradas;

K – Módulo de riqueza em betume;

km – Quilómetro;

kN – Kilonewton;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

MBR-BBM – Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com média percentagem de borracha;

Mg/m³ – Miligrama por metro cubico;

mm – Milímetros;

mm/min – Milímetros por minuto;

mm²/min – Milímetros quadrados por minuto;

n – Porosidade;

NP – Norma Portuguesa;

Pb – Teor de betume residual;

p_b – Peso de betume na mistura;

p_i – Peso do inerte;

pH – Grandeza físico-química de potencial hidrogénio, que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de um componente;

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*;

Se – Superfície específica;

VMA – Volume de vazios na mistura de agregados;

WA₂₄ – Absorção de água;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os problemas ambientais que existem no nosso planeta são cada vez mais uma preocupação da nossa sociedade. No estado atual, os problemas ambientais passaram a ser um problema da sociedade, algo que todos nós devemos ter em atenção, por forma a procurar soluções que acabem com algumas das fontes de poluição no nosso ecossistema. Na engenharia, esta abordagem é feita em todos os seus campos.

Os pneus usados de veículos ligeiros e pesados, que contêm resíduos perigosos para o nosso ambiente, são uma das maiores fontes de poluição que existem no nosso planeta, tornando-se cada vez mais necessário encontrar formas de reciclagem para os mesmos. Recentemente, a borracha proveniente de pneus reciclados tem vindo, de entre outras aplicações, a ser usada como agregado para misturas betuminosas.

Um pouco por todo o mundo o uso de produtos betuminosos em pavimentos rodoviários flexíveis é uma prática generalizada. No entanto, tem havido um esforço para melhorar o desempenho destes pavimentos, contribuindo para isso a adição de borracha, melhorando as misturas betuminosas. Vários estudos têm verificado que o betume modificado com borracha, normalmente designado por BMB, tem vindo a demonstrar bons desempenhos. Algumas dessas melhorias devem-se ao facto de a mistura ter uma maior viscosidade, que melhora a viscoelasticidade e ductilidade do ligante e melhora assim as propriedades elásticas das misturas betuminosas, mais concretamente, a resistência às tensões de tração e a capacidade de recuperação de deformações, quer a baixas, quer a altas temperaturas (Minhoto et al., 2002). Os polímeros também podem contribuir para uma melhor adesividade do ligante com o agregado (Specht, 2004).

Sendo assim, o BMB tem demonstrado ser uma mais-valia para o meio ambiente e para um melhor desempenho das misturas betuminosas nos pavimentos flexíveis. Deste modo, e para que se possa tirar um maior partido deste betume, nesta dissertação será estudado o comportamento das misturas betuminosas com adição de borracha perante agregados de baixa adesividade, verificando, assim, se o granulado de borracha inserido será um bom aditivo a fim de melhorar o comportamento destas mesmas misturas. Este estudo procurará contribuir para a otimização das misturas betuminosas com borracha, aproveitando melhor as vantagens e capacidades das mesmas.

1.2.Motivação

Desde cedo, como utilizador da rede viária nacional, houve fascínio por estradas. As dúvidas pela forma de pensar para o planeamento das mesmas falaram mais alto. A maneira como as vias rasgam os montes e vales do nosso país e os processos que existem de conceção das mesmas sempre suscitaram alguma curiosidade.

A magnitude de grandes estradas e obras de arte que nelas se incorporam, a sua imponência, levaram à escolha deste curso. Mais tarde, e durante o curso, as cadeiras pertencentes ao plano curricular sobre vias de comunicação, pavimentação rodoviária, infraestruturas de transporte e algumas palestras que envolviam vias de comunicação, foram um grande impulso para a decisão de querer fazer uma dissertação nesta área. Ao listarem-se as propostas de dissertação, este tema suscitou maior interesse, sendo este numa área da qual não tinha muitos conhecimentos.

As misturas betuminosas com adição de borracha são claramente uma aposta no futuro, pois acarretam bastantes vantagens tanto ao nível da resistência como ao nível da ecologia. A maneira como os agregados interagem com a borracha ainda é uma questão para a qual não há respostas e que muito pode contribuir para uma melhor conceção de misturas betuminosas, tirando assim um maior partido das suas capacidades. O facto de este ser um estudo pioneiro e o poder fazer parte de uma equipa que tenta melhorar estas novas misturas, são claramente fatores motivadores para a escolha deste tema.

1.3.Objetivos

A falta de conhecimento no âmbito da interação da borracha com os agregados nas misturas betuminosas com adição de borracha é um entrave para um melhor desenvolvimento destas misturas. Um bom conhecimento e estudo dos agregados pode projetar as misturas para melhores desempenhos ao nível do dimensionamento de pavimentos flexíveis, podendo as granulometrias e tipos de agregados serem adaptados a diferentes casos.

Nesta dissertação, o autor tem, primeiramente, o objetivo de dar a conhecer as misturas betuminosas com adição de borracha, referindo a constituição das misturas, bem como os diferentes tipos de produção e vantagens das mesmas. De seguida, estudar-se-á o desempenho da relação da borracha com agregados de baixa adesividade, formulando misturas betuminosas com borracha. Estas formulações serão feitas adicionando a borracha diretamente na mistura, podendo estas ser consideradas como fabricadas por via seca.

1.4. Organização

Esta dissertação divide-se em 4 capítulos principais, sendo o capítulo 5 a conclusão dos resultados obtidos no estudo.

No capítulo 2, é descrito, de uma forma geral, as misturas betuminosas com adição de borracha, desde os processos de trituração da borracha, aos métodos de obtenção da mistura betuminosa. Neste capítulo, também é feita uma pequena descrição do estudo já existente sobre a ligação betume-agregado.

No capítulo 3, é exposto o estudo realizado nesta dissertação, descrevendo ensaios e procedimentos experimentais, e escolhas efetuadas para uma melhor obtenção de resultados para análise.

No capítulo 4, estão representados os resultados obtidos dos ensaios e a análise dos mesmos, que levou às conclusões finais desta dissertação (Cap. 5).

Na parte final, encontram-se, em anexo, os resultados das granulometrias e massas volúmicas dos agregados usados nas formulações deste trabalho.

2. MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE BORRACHA

2.1. Conceitos Gerais

Ao longo dos anos, o homem foi desenvolvendo novos tipos de pavimentos rodoviários, aumentando a segurança e conforto da via. As camadas dos pavimentos são constituídas por componentes de alto custo e merecem uma atenção especial.

O aumento do custo dos materiais de construção, nomeadamente os derivados do petróleo, e a escassez desses mesmos produtos naturais, aliado às novas exigências construtivas e de manutenção dos mesmos, leva a que se procure novos materiais que possam apresentar bons desempenhos e baixo custo. As misturas betuminosas com adição de borracha vieram fomentar essas melhorias, graças às propriedades que a borracha veio dar à mistura.



Figura 1 - Depósito de pneus em Westley, California, USA (Fonte: Burtynsky (1999))

Os pneus, no final da sua vida útil, pelos problemas ambientais e sanitários que advêm da sua inutilização, são uma das grandes preocupações da humanidade. Não sendo a borracha um produto biodegradável, é indeterminado o tempo de decomposição do mesmo, e sendo este um produto nocivo, existe uma grande preocupação na reciclagem de pneus. Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ABR), entre 1999 e 2007, foram reaproveitadas 700 mil toneladas de pneus usados, o que equivale a cerca de 18 milhões de pneus anuais (Indriunas, 2008). Como se pode verificar na Tabela 1, na União Europeia são produzidas anualmente cerca de 2.542.640 toneladas de pneus usados.

Tabela 1 - Acumulação anual de pneus usados nos países da União Europeia. (Vicente, 2006)

País	Pneus usados	População	Pneus/hab
Holanda	65.000	15.492.800	0,004
Bélgica	70.000	10.143.000	0,007
Espanha	330.000	39.241.900	0,008
Inglaterra	400.000	58.684.000	0,007
Itália	360.000	57.330.500	0,006
Áustria	41.000	8.045.800	0,005
Grécia	58.500	10.474.600	0,006
Portugal	45.000	9.920.800	0,005
França	380.000	58.625.400	0,006
Suécia	65.000	8.737.500	0,007
Alemanha	650.000	81.845.000	0,008
Total	2.542.640	372.552.900	0,007

Nesta tabela, também podemos verificar que os países da União Europeia com maior produção de pneus usados por habitante são a Alemanha e a Espanha, sendo Portugal um dos países com uma das mais baixas produções de pneus. Uma das formas de reaproveitamento destes pneus é a adição dos mesmos em forma de agregado granulado, em misturas betuminosas.

O facto de os pneus provenientes de veículos pesados, em comparação com os provenientes de veículos ligeiros, terem uma maior percentagem de borracha e não apresentarem têxteis na sua constituição, torna-os nos mais recomendados para o fabrico de misturas betuminosas (Payán, 2004).

Nas obras de Engenharia Civil, por serem utilizadas grandes quantidades de material com alto peso específico e baixo valor agregado (comparativamente com outras engenharias), há cada vez mais a necessidade de utilizar diversos resíduos. A possibilidade de utilização desses resíduos tem motivado o surgimento de tecnologias capazes de reutilizar estes materiais em obras de pavimentação, como é o caso da borracha oriunda de pneus usados (Specht, 2004).

Segundo Ribeiro (2012), “a produção de betume modificado com borracha (BMB) é um processo caracterizado pela incorporação de granulado de borracha no betume, embora não

seja uma simples adição do granulado de borracha no betume. A modificação do betume é obtida através da digestão do granulado de borracha pelo betume durante um certo período de tempo”.

Vários são os processos de obtenção da borracha, e vários são os processos de produção. Deste modo, neste capítulo, descreve-se a composição, as vantagens e as formas de obtenção do granulado de borracha para as misturas betuminosas com adição de borracha.

2.2. Breve história da utilização de Misturas betuminosas com adição de borracha

Durante vários anos, o estudo da integração da borracha sintética em ligantes asfálticos foi desenvolvido por engenheiros e químicos com o objetivo de melhorar as propriedades elásticas desses mesmos ligantes. No entanto, foi apenas na década de 40 que se iniciou a aplicação de borracha reciclada proveniente de pneus usados em materiais para pavimentação asfáltica. A Companhia de Reciclagem de borracha, *U. S. Rubber Reclaiming Company*, introduziu no mercado um produto composto por material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado *RamflexTM* (Oda & Júnior, 2001).

Em 1963, Charles H. McDonald, considerado o pai do sistema *asphalt-rubber* nos Estados Unidos, deu início a uma pesquisa com o intuito de desenvolver um material “altamente elástico” com incorporação de borracha moída, para ser aplicado em reabilitação de pavimentos. Dessas pesquisas resultou um produto composto por ligante asfáltico e 25% de granulado de borracha proveniente de pneus usados, que foi misturado a 190°C durante 20 minutos, para ser usado em remendos (Oda & Júnior, 2001).

Mais tarde, nos anos 70, surgiram dois processos de introdução da borracha nas misturas betuminosas: processo húmido; processo seco (Ribeiro, 2012).

Desde aí, foram vários os estudos e os avanços tecnológicos até aos dias de hoje. Atualmente, o AR (*Asphalt Rubber*) é feito utilizando 20% de granulado de borracha de pneus relativamente ao teor de betume e é frequentemente referido como o “*Arizona asphalt rubber binder*”. O método por via seca foi desenvolvido na Suécia utilizando fragmentos de pneus de borracha como agregado para ajudar a reduzir o gelo nas estradas.

Em Portugal, as misturas betuminosas com adição de borracha foram usadas pela primeira vez em 1999, na reabilitação da EN 104 entre Azurara e Trofa. Entre o período de 1999 e 2000, também foi reabilitada, com auxílio do mesmo material, a EN 105 entre Travagem e Santo Tirso (Ribeiro, 2012).

A primeira obra com betume modificado com borracha por via seca, realizada em território português, ocorreu em Maio de 2009, na EN 370 que liga Avis e Arraiolos. Esta pavimentação, com um total de 14km, aconteceu no âmbito de uma reabilitação entre Avis e a ligação a Portalegre/Évora (Ribeiro, 2012).

Desde então, várias têm sido as intervenções no nosso país com recurso a misturas betuminosas com adição de borracha, tanto em construção como reabilitação, que se estenderam a Itinerários Complementares, Itinerários Principais e Autoestradas.

2.3.Materiais para BMB

A produção de misturas betuminosas com adição de borracha tem como grande característica a inclusão de borracha granulada na mistura. O betume e a borracha irão interagir, criando, assim, um ligante de características especiais, denominado de betume modificado com borracha (BMB).

Neste capítulo, descrevem-se os dois materiais usados na produção do BMB, nomeadamente, o betume e o granulado de borracha.

2.3.1. Betume

O betume é o material mais importante para a produção de misturas betuminosas, pois é o ligante que vai interligar todos os outros componentes da mistura. Existem vários ligantes betuminosos, como o betume asfáltico, o asfalto e o alcatrão. Existem ainda os ligantes hidráulicos, como é o caso do cimento. Dos vários ligantes existentes utilizados na pavimentação rodoviária, o mais usado em Portugal é, de longe, o betume asfáltico (Ribeiro, 2012).

Os alcatrões usados em pavimentação resultam de processos de refinação de alcatrões brutos que têm origem na destilação de carvões durante a fabricação de gás (Amaral, 2000).

Já os asfaltos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. São oriundos do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos por evaporação natural de depósitos localizados à superfície terrestre ou por destilação em unidades industriais especialmente projetadas para este fim (Amaral, 2000).

O betume numa mistura betuminosa tem a função de:

- Permitir a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa possua resistência à tração;
- Conferir trabalhabilidade à mistura betuminosa;
- Garantir flexibilidade à mistura betuminosa;
- Assegurar impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa.

O betume é, tradicionalmente, considerado como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos de alta massa molecular dispersas ou dissolvidas num meio oleoso de baixa massa molecular, que são os maltenos (Whiteoak (2003), citado em Fontes (2009)).

Em Portugal, os betumes obtidos nos processos de refinação do petróleo bruto devem cumprir os requisitos da Norma Europeia NP EN 12591 (IPQ, 2011a) Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação (EN 12591 *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumen*), que especifica as propriedades e os respetivos métodos de ensaio adequados para a caracterização deste tipo de betumes.

Na Tabela 2, são apresentadas as propriedades e os valores para os betumes 35/50 e 50/70 de acordo com o caderno de encargos das Estradas de Portugal (EP, 2012).

Tabela 2 - Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (EP, 2012)

Propriedades		Normas	Unidade	Betume 35/50	Betume 50/70
Penetração, 25°C		EN 1426: 2007	0,1 mm	35-50	50-70
Temperatura de Amolecimento – Método Anel e Bola		EN 1427: 2007	°C	50-58	46-54
Viscosidade Cinemática, 135 °C		NP EN 12595: 2009	mm ² /s	≥370	≥295
Solubilidade		NP EN 12592: 2009	%	≥99	
Temperatura de Inflamação em vaso aberto Cleveland		EN ISO 2592	°C	≥240	≥230
Teor em parafinas		EN 12606-2	%(m/m)	≤4,5	
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT(c) a 163°C, NP EN 12607-1)	Variação em massa(a) (Valor Absoluto)	NP EN 12607-1	%	≤0,5	
	Índice de Penetração (b)	EN12591 Anexo A	-	-1,5- +0,7	
	Temperatura de fragilidade de Fraass (b)	EN 12593	°C	≤-5	≤-8
	Penetração retida	EN 1426	%	≥53	≥50
	Aumento da temperatura de amolecimento - severidade 2	EN 1427	°C	≤11	

(a) A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa.

(b) Esta propriedade está associada ao nível de severidade 2 da propriedade “Aumento da temperatura de amolecimento”, Após envelhecimento com RTFOT.

(c) *Rolling Thin Film Oven Test*

Das propriedades apresentadas no quadro anterior, algumas são especialmente importantes para a caracterização dos betumes, como é o caso da penetração a 25°C, a temperatura de amolecimento, a viscosidade cinemática e o ensaio de envelhecimento RTFOT. Rodrigues (2012) faz uma descrição destes principais ensaios.

O objetivo do ensaio de penetração é obter de forma indireta a viscosidade dos betumes. O ensaio consiste em penetrar uma amostra de betume com uma agulha de dimensões e peso segundo a respetiva norma à temperatura de 25 °C durante 5 segundos, verificando assim a profundidade de penetração. Os valores obtidos representam os vários tipos de betume existentes, classificados segundo a especificação LNEC E-80 de 1997, entre 10/20 para betumes mais duros e 250/330 para betumes mais fluídos. Assim, um betume 35/50 é um betume em que a agulha penetra entre 3,5 mm (35 décimos) e 5 mm (50 décimos). Os betumes para pavimentação mais utilizados em Portugal são os betumes 35/50 e 50/70 (Rodrigues, 2012).

Através do método anel e bola, determina-se a temperatura de amolecimento do betume, que irá servir para classificar o betume para elevadas temperaturas. Este ensaio consiste na colocação em água de um provete de betume contido num anel, sendo essa água sujeita a um aquecimento (5°C/min). Com o progressivo aquecimento, o provete começa a deformar devido ao peso da esfera, conduzindo ao seu escoamento através do anel. Quando o betume e a esfera atingem a altura de 2,5 cm, regista-se a temperatura da água. São feitos dois provetes para ensaio, e a média dos resultados determinará o ponto de amolecimento do betume ensaiado (Rodrigues, 2012).

A viscosidade cinemática é a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica de um líquido, à temperatura de determinação da viscosidade. O ensaio consiste em determinar o tempo de escoamento de um determinado volume de líquido através do capilar de um viscosímetro de vidro calibrado a determinada temperatura, rigorosamente controlada (tempo de escoamento). A viscosidade cinemática é calculada multiplicando o tempo de escoamento em segundos pelo fator de calibração do viscosímetro (Rodrigues, 2012).

O ensaio pelo método de RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), ou seja, Ensaio de Película Fina Rotativa em Estufa, é especificado pela Norma Portuguesa NP EN 12607-1: 2009 e tem como objetivo produzir o endurecimento do betume através do efeito combinado de calor e ar numa película fina móvel de betume ou ligante betuminoso, simulando o envelhecimento que um ligante betuminoso sofre durante a mistura numa instalação de fabrico de misturas betuminosas (Rodrigues, 2012).

Para este trabalho, foram produzidas misturas betuminosas, às quais se realizaram um conjunto de ensaios experimentais. Para todas as misturas betuminosas produzidas foi utilizado o mesmo tipo de betume, mais precisamente, o betume 35/50.

2.3.2. Granulado de Borracha

Como já foi referido atrás nesta dissertação, a borracha é uma das maiores fontes de poluição do nosso planeta. Devido ao seu processo de vulcanização, a borracha tem um período de degradação na natureza indeterminado.

A queima de pneus não é uma solução aceitável, devido aos gases poluentes que são libertados. O armazenamento inadequado de pneus usados, como o armazenamento a céu aberto, também apresenta vários problemas (Ribeiro, 2012).



Figura 2 - Incêndio de pneus (Fonte: Araújo (2009))

Para diminuir estas soluções pouco viáveis, a comunidade científica tem vindo a estudar esta problemática para que os pneus possam ser reaproveitados de uma forma ecologicamente viável.

A borracha vulcanizada é, sem dúvida, a principal matéria-prima resultante da reciclagem de pneus, sendo que depois do processamento que se efetua, resultam como produtos finais: têxtil; aço; granulado de borracha (Ribeiro, 2012).

Segundo Rodrigues (2012), o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril e mais tarde as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 43/2004, estabelecem os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados. Estes têm como objetivos a prevenção da produção destes resíduos, a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização, visando-se a redução da quantidade de resíduos a eliminar, bem como a melhoria do desempenho de todos os intervenientes no ciclo de vida dos pneus.

O gráfico da Figura 3 indica os valores de borracha utilizada para cada aplicação final de reciclagem.

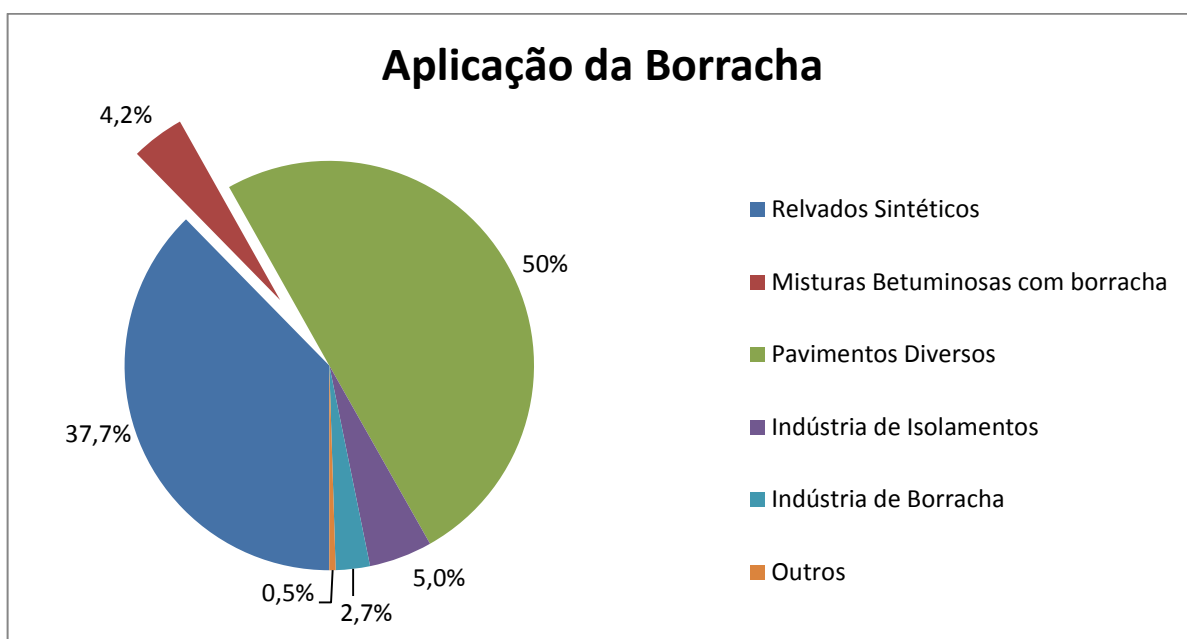


Figura 3 - Aplicações finais do granulado de pneus reciclados (Valorpneu, 2012)

Deste modo, a borracha proveniente de pneus usados pode ser utilizada como matéria-prima na construção civil, mais concretamente, e analisado nesta dissertação, utilizada na conceção de misturas betuminosas.

2.3.2.1. Processos de obtenção do granulado de borracha

Para que se possa utilizar a borracha oriunda dos pneus usados na formulação de misturas betuminosas, esta terá que ser transformada granulometricamente de acordo com as necessidades das mesmas misturas betuminosas. Desta forma, os pneus terão que passar por um conjunto de processos até que se obtenha o granulado final da borracha. Através de uma separação magnética, são retirados os arames existentes nos pneus e, por um mecanismo de sucção, são separados os têxteis da borracha (Vicente, 2006). Após isto, a borracha é moída até se obter a granulometria desejada.

Existem dois processos para a obtenção do granulado de borracha oriunda dos pneus:

- Moagem ambiental ou trituração mecânica – Primeiro, a borracha é cortada em tiras à temperatura ambiente e depois, com recurso a moinhos de alta potência, é sujeita a um processo faseado de moagem. Através deste processo de trituração, obtêm-se partículas com dimensões na ordem dos 0,8 mm (Vicente, 2006).
- Criogénico – Existe, inicialmente, uma fragmentação dos pneus à temperatura ambiente, ficando estes em pedaços com uma dimensão média de 2,25 cm. De seguida, e com recurso ao nitrogénio líquido, arrefece-se a borracha, ficando solidificada como vidro. Deste modo, a borracha vai ter um comportamento frágil, e com recurso a moinhos de martelos especiais com alta energia de impacto, estilhaça-se a borracha, ficando esta com uma granulometria fina de dimensões inferiores a 0,4 mm (Vicente, 2006).



Figura 4 - Granulado de borracha (Fonte: Ivson (2007))

O granulado de borracha vai participar na mistura betuminosa como agregado, substituindo, assim, uma percentagem de agregados finos da mistura (via seca) ou, por outro lado, pode ser adicionado diretamente ao betume, originando, assim, o BMB, betume modificado de borracha (via húmida).

2.4.Misturas betuminosas por via húmida – BMB

Um dos métodos de fabrico, ou conceção, da mistura betuminosa com adição de borracha é o fabrico por via húmida, ou *wet process*. Esta via consiste na adição da borracha diretamente ao betume. Desta adição irá surgir um novo betume, o betume modificado com borracha

(BMB). Segundo Antunes et al. (2002), a temperatura do betume convencional deve estar compreendida entre 175°C e 220°C quando a borracha de pneus é adicionada, mantendo contacto por cerca de 45 minutos à temperatura de 180°C.

Neste caso, “o melhor desempenho do BMB é conseguido por granulado de borracha obtido pelo método criogénico. Comparativamente com as misturas betuminosas convencionais, a presença de borracha no ligante melhora a suscetibilidade térmica da mistura de modo a que a altas temperaturas se comporte com mais viscosidade e a baixas temperaturas se apresente mais flexível” (Pereira et al., 2007). Assim, iremos ter misturas betuminosas com maior resistência ao fendilhamento e, consequentemente, com uma maior durabilidade.

Muitos materiais poliméricos com alto peso molecular, como é o caso da borracha, podem apresentar variações de volume quando imersos em materiais com baixo peso molecular, que é o que acontece quando este é envolvido no betume, absorvendo certos óleos aromáticos contidos no betume, tornando-o mais dúctil, aumentando assim a sua viscosidade (Specht, 2004).

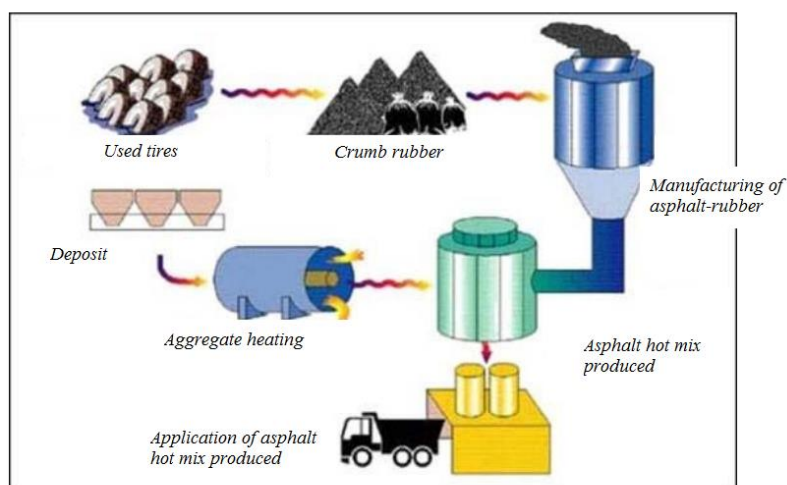


Figura 5 - Fabrico por via húmida (Fonte: Neto et al. (2006))

O fabrico desta mistura tem duas fases de execução. Primeiro, é feita uma adição de uma determinada quantidade de granulado de borracha ao betume base. Num segundo momento, adiciona-se outra quantidade de granulado para a interação com o betume base, a que se dá o nome de fase de “digestão” (Batista, 2004).

Nas misturas por via húmida, o granulado de borracha proveniente de pneus usados está compreendido em cerca de 5 a 25% do peso total do ligante (Oda & Júnior, 2001). Esta adição, e consequente formulação da mistura betuminosa, pode ser feita através do sistema *continuous blend* ou *terminal blend*.

O sistema *continuous blend* pode ser feito na central de asfalto ou em camiões destinados para este fim, onde o produto é utilizado imediatamente após a sua produção, podendo este ser armazenado até no máximo 4 horas após a produção (Fontes et al., 2007).



Figura 6 - Camião preparado para fabrico de BMB, sistema *continuous blend* (Fonte: CEI-interprises (2012a))

Segundo Morilla and Greca (2003), citado em Fontes et al. (2007), “no sistema *terminal blend*, a modificação física, reológica e química do asfalto convencional é realizada através de um adequado processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica em moinhos de cisalhamento devidamente controlada que resulta num produto uniforme e estável porque possui estabilidade que não permite que ocorra a separação de fases durante o armazenamento.” Depois de armazenada, a mistura está pronta para ser transportada para a obra, para que, posteriormente, seja aplicada.



Figura 7 - Central de fabrico de betume, sistema *terminal blend* (Fonte: CEI-interprises (2012b))

Ainda assim, existem divergências acerca da conceção nos sistemas *continuous blend* e *terminal blend* do processo húmido. Vários autores consideram que o sistema *terminal blend*

não é um processo húmido, mas sim um tipo diferente de betume modificado de borracha. Desta forma, alguns autores consideram que existem três processos de produção de BMB: o processo húmido; o processo seco; o processo *terminal blend* (Ribeiro, 2012).

Como por via húmida a borracha oriunda dos pneus é previamente adicionada ao betume convencional, este vai ser alterado permanentemente. Nesse processo, ocorre a transferência efetiva dos polímeros e dos componentes químicos dos pneus para o betume, que vai aumentar a elasticidade e resistência ao envelhecimento da mistura betuminosa (Fontes, 2009). Sendo o fabrico por via húmida a forma mais usual de conceção de misturas betuminosas com adição de borracha, existem inúmeros estudos em torno deste fabrico, estando bem conhecidas as vantagens e o comportamento que a mistura terá em serviço. Como já foi referido anteriormente neste documento, a adição de borracha na mistura betuminosa aumenta a viscoelasticidade da mesma. No entanto, segundo Fontes (2009), existem outras vantagens:

- Maior resistência ao fendilhamento devido à elevada percentagem de betume;
- Melhor resistência ao envelhecimento e oxidação devido à elevada percentagem de betume;
- Melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas devido à elevada percentagem de betume;
- Maior resistência à deformação permanente tendo em conta o aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento;
- Redução do ruído devido à maior película de betume (principalmente em texturas abertas);
- Redução do efeito de projeção de água (splash spray) durante as chuvas (principalmente em texturas abertas);
- Redução dos custos de conservação considerando o melhor desempenho do pavimento;
- Maior resistência à desagregação devido à espessura da película de betume que recobre o agregado;
- Menores custos de vida útil devido ao melhor desempenho da mistura;
- Poupança de energia e de recursos naturais através da utilização de materiais reaproveitados.

As misturas betuminosas fabricadas com BMB (via húmida) requerem, normalmente, maiores teores de ligante do que as misturas betuminosas convencionais. Existem, pelo menos, duas razões para que isso aconteça (Specht, 2004):

- O *asphalt-rubber* é mais viscoso que os ligantes convencionais, formando uma cobertura mais espessa na superfície do agregado;
- As partículas de borracha que não tenham reagido com o betume atuarão como sólidos, aumentando de volume de ligante, mas não relativamente às características de adesividade.

2.5. Misturas betuminosas por via seca

O fabrico de misturas betuminosas por via seca, designado por *dry process*, consiste na adição da borracha como agregado (normalmente 1% a 3% da massa do agregado na mistura) antes de se adicionar o ligante asfáltico. Este processo é utilizado em vários países na Europa; contudo, não se utiliza em Portugal (Oda & Júnior, 2001; Vicente, 2006).

Um dos processos de mistura a seco existentes é conhecido por *PlusRide* e foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos da América; nele são usadas partículas de borracha de dimensão compreendida em 1,6mm a 6,4mm (Kandhal, 1992). A FHWA (*Federal Highway Administration*) define o processo seco como qualquer método que adicione CRM (*crumb rubber modified*) diretamente na mistura, onde o agregado pré-aquecido é misturado com a borracha e, posteriormente, misturado com o betume (Specht, 2004).

A granulometria, normalmente, é a mesma que a utilizada em misturas convencionais; porém, as temperaturas têm de ser maiores que as convencionas, tanto na mistura como na compactação (Specht, 2004).

Neste processo, os agregados são aquecidos a temperaturas entre 200 e 210°C, durante 15 segundos, até se obter uma mistura homogénea. Posteriormente, o betume convencional é aquecido a temperaturas entre 140°C e 160°C e adicionado à mistura de borracha e agregados (Ribeiro, 2012).

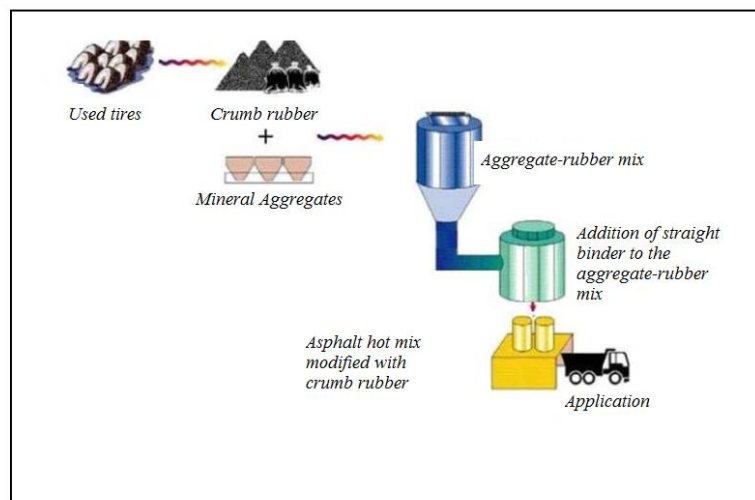


Figura 8 - Fabrico por via seca (Fonte: Neto et al. (2006))

Takallou and Hicks (1988) apresentaram uma revisão geral sobre a utilização de misturas com borracha no processo seco, apoiando-se no método PlusRide. Tendo em conta o volume de tráfego, as granulometrias são adaptadas, como se pode verificar na Tabela 3. Na Tabela 4, são apresentadas as especificações da granulometria da borracha (Specht, 2004).

Tabela 3 - Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego (Takallou & Hicks, 1988)

Característica	Especificação		
	A-PlusRide 9.	B-PlusRide 12	C-PlusRide 16.
Tráfego médio diário	2500	2500-10000	10000
Espessura mínima (cm)	2,50	3,80	4,45
% acumulado passado			
3/4"			100
5/8"		100	
1/2"			
3/8"	100	60-80	50-62
1/4"	60-80	30-40	30-44
10	23-38	19-32	19-32
30	15-27	13-25	12-23
200	8-12	8-12	7-11
<i>Critérios preliminares de mistura</i>			
% borracha ¹	3,0	3,0	3,0
Volume (aprox.)	6,7	6,7	6,7
% betume	8,0-9,5	7,5-9,0	7,5-9,0
Vol. máx. vazios	2,0	2,0	2,0

¹A percentagem de borracha, refere-se relativamente ao peso de betume usado na mistura

Tabela 4 - Especificações para a granulometria de borracha (Takallou & Hicks, 1988)

Peneiro	% Passada		
	Borracha granular	Borracha fina	Mistura 80/20
1/4"	100		100
4	70-90		76-92
10	10-20	100	28-36
20	0-5	50-100	10-24

Vários autores referem que o tempo de digestão é fundamental para um bom proveito da mistura. Estes mesmos autores referem problemas de desagregação da mistura, quando o tempo de digestão não é considerado (Specht, 2004).

Este método é menos popular que o processo por via húmida, pois tem uma prestação em serviço relativamente inferior. Tem pouca reprodutibilidade e apresenta algumas dificuldades aquando da construção do pavimento, o que acarreta custos elevados. No entanto, a via seca permite utilizar maiores quantidades de borracha e tem, por isso, vantagens ambientais (Antunes et al., 2004).

O processo seco é utilizado, somente, para misturas betuminosas a quente, não sendo recomendadas para outros tipos de camadas, como, por exemplo, tratamentos superficiais (Heitzman, 1992).

As técnicas usadas neste processo, são contudo, muito semelhantes às usadas no fabrico de betume convencional, mas, segundo Vicente (2006), existem muitos estudos que demonstram que o uso destas técnicas com a adição de borracha tornam as misturas melhoradas.

Nos Estados Unidos da América, esta técnica tem sido usada em vários estados, tendo-se obtido bons resultados. Estes resultados positivos verificam-se, sobretudo, em zonas de clima frio, como é o caso do Alasca, onde se obteve bons resultados na resistência à derrapagem e ao comportamento do material em períodos de degelo (Specht, 2004).

Neste processo, o volume de vazios na mistura betuminosa está compreendido entre 2% e 4%, e com uma percentagem de betume de 7,5% a 9,0% (Fontes, 2009).

As possíveis reações entre as partículas de borracha granulada e o betume convencional que ocorrem no processo seco dependem da granulometria da borracha utilizada. A utilização de granulado de borracha com elevada superfície específica aumenta a área de contacto betume-borracha, favorecendo as possíveis reações entre estes materiais durante pequenos intervalos de tempo e a temperaturas relativamente baixas, quando comparadas àquelas utilizadas no processo húmido (Neto, 2004).

A análise reológica, feita com equipamentos evoluídos tecnologicamente, demonstra uma superioridade dos ligantes modificados. No entanto, certos ensaios laboratoriais realizados em amostras de misturas betuminosas modificadas com borracha nem sempre confirmam esta tendência. Este facto deve-se à dificuldade em simular-se em laboratório condições peculiares da vida de serviço em campo (Specht, 2004).

Mais à frente, nesta dissertação, será explicado o processo experimental feito para o estudo. As formulações que se desenvolveram com adição de borracha seguiram os critérios do método por via seca, apesar das quantidades utilizadas terem sido as normalmente usadas no método por via húmida. Dado que a borracha aumenta o volume da mistura, utilizaram-se as quantidades usadas habitualmente para o processo húmido, pois são menores que as usadas no processo seco.

Dado o estado incipiente do conhecimento do comportamento deste tipo de misturas betuminosas, surge a dúvida sobre o comportamento das mesmas em agregados de baixa adesividade, para que se possa concluir até que ponto a borracha poderá ser um bom aditivo para agregados com este défice de comportamento. Deste modo, pretende-se com esta dissertação estudar o comportamento destas misturas, incluindo o estudo da interligação da borracha com o agregado.

2.6.Ligação Betume-Borracha

As grandes vantagens que se obtêm através do betume modificado com adição de borracha provêm da ligação betume-borracha. Como no processo húmido a borracha é previamente adicionada ao betume, estas vantagens serão mais evidentes. Por isso, neste subcapítulo será avaliada a ligação betume-borracha no processo húmido.

Ao adicionar a borracha ao betume, este vai aumentar de volume, sendo esta reação influenciada pelos seguintes fatores:

- temperatura da mistura;
- tempo de digestão;
- quantidade de borracha incorporada;
- tipo do misturador mecânico;
- tamanho e textura da borracha;
- componente aromática do betume.

A reação do betume com a borracha envolve a absorção de óleos aromáticos do betume nas cadeias de polímeros que incluem os principais componentes estruturais da borracha (Fontes, 2009).

O processo de reação do betume com as partículas de borracha está dependente da temperatura. Em temperaturas mais elevadas, existe uma reação mais rápida e pode resultar num maior aumento de volume da borracha no betume. As temperaturas usuais para produção de betume-borracha variam entre 160 °C a 205 °C. Normalmente, o betume com borracha mantém as propriedades físicas durante, pelo menos, 24 horas após a produção a temperaturas na ordem dos 175 °C. Contudo, com temperaturas mais elevadas pode ocorrer, dentro de três a seis horas, a despolimerização da borracha (Hicks & Epps, 2000).

Martins (2001), que realizou ensaios termogravimétricos com borracha triturada de pneus usados, constatou que a partir de 230 °C inicia-se a um processo de degradação da borracha, sendo, então, os 230°C a temperatura máxima de processamento da mesma.

A intensidade da agitação entre o betume e a borracha, durante o tempo de digestão, pode influenciar as propriedades do betume com borracha. Essa intensidade pode variar entre baixa velocidade de agitação, em que, lentamente, mantém as partículas de borracha em suspensão, e elevada velocidade de agitação, a qual pode levar à quebra das partículas de borracha. Com baixa velocidade de agitação, os componentes do betume são simplesmente absorvidos com o aumento de volume das partículas de borracha, ocorrendo pouca dispersão da borracha no betume. No entanto, com grande velocidade de agitação, as partículas de borracha aumentam e amolecem devido à absorção do betume, podendo ocorrer uma dispersão da borracha no betume (Hicks & Epps, 2000).

Existem diversos óleos extensores ou aditivos que podem ser acrescentados ao betume com borracha para alterar as propriedades da mistura. Em geral, são utilizados óleos aromáticos ou óleos nafténicos. Estes materiais tornam o betume menos rígido a baixas temperaturas (Hicks & Epps, 2000).

Um modelo existente para explicar a interação que as partículas de borracha e o betume vão ter é descrito por Holleran and Reed (2000). Os asfaltenos e as frações leves (óleos maltenos, resinas, etc.) dos ligantes asfálticos convencionais interagem com as partículas de borracha formando uma película de gel sobre estas partículas, produzindo um aumento de volume das mesmas, conforme apresentado na Figura 9.

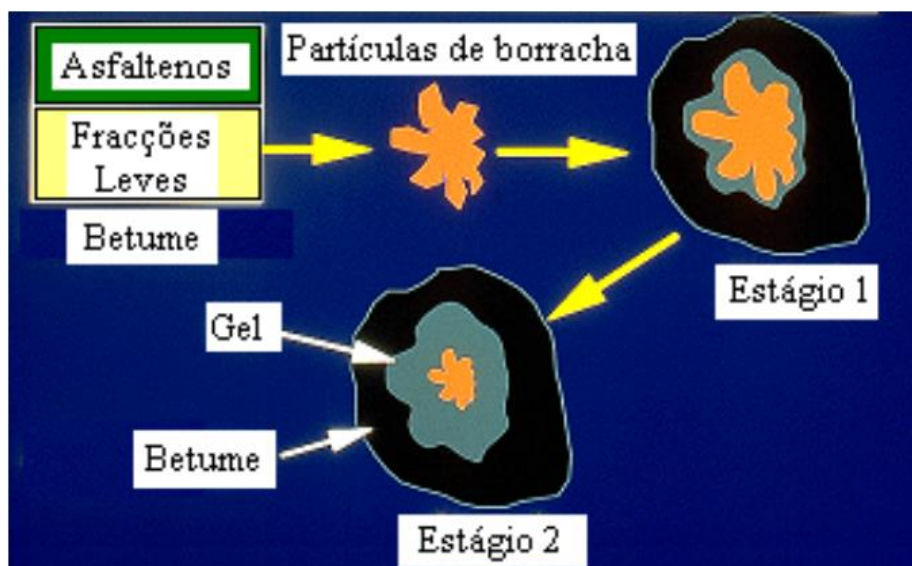


Figura 9 - Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha e o betume convencional (Fonte: Holleran and Reed (2000))

A absorção das frações leves do ligante convencional pelas partículas de borracha progride com o tempo sob elevadas temperaturas, causando um aumento da viscosidade do BMB. Como é mostrado na Figura 10, após um tempo de digestão muito prolongado e juntando as altas temperaturas a que o material é aquecido, este tende a deteriorar-se.

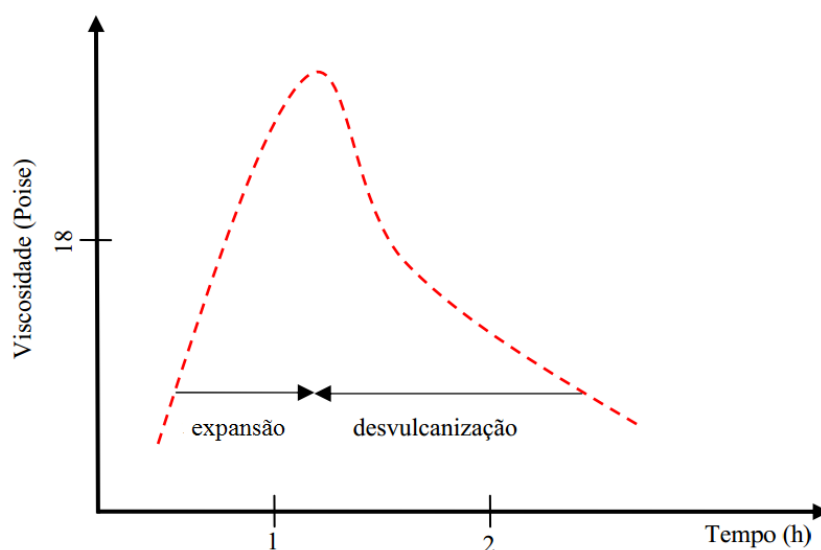


Figura 10 - Efeito do tempo de digestão na viscosidade do betume-borracha. (Fontes, 2009)

O aumento de volume da borracha é uma difusão e não uma reação química (não há ligações livres na borracha vulcanizada para interação química com o asfalto) e resulta do movimento de líquidos em direção ao interior do polímero. Logo após a imersão em meio

oleoso, a superfície da borracha fica com alta percentagem de líquidos. Com o passar do tempo, estes líquidos movem-se para o interior da partícula, sendo estes movimentos controlados pela compatibilidade molecular da borracha e do líquido, pelo tempo de imersão e pela viscosidade do líquido. As fortes atrações moleculares nas cadeias da borracha evitam a decomposição da mesma em meio oleoso. Entretanto, pode haver, em casos de longa exposição em condições favoráveis, uma degradação do polímero (Specht, 2004).

Também Specht (2004) fez uma pesquisa sobre alguns fusos granulométricos usados em alguns estados americanos (Tabela 5).

Tabela 5 - Fusos granulométricos específicos para a borracha em alguns estados americanos (Specht, 2004)

Peneiros nº	Abertura (mm)	Arizona	Califórnia	Flórida – Tipo A	Flórida – Tipo B	Flórida – Tipo C
8	2,38	---	100	---	---	---
10	2,00	100	95-100	---	---	100
16	1,19	75-100	40-80	---	---	---
20	0,84	---	---	---	100	85-100
30	0,59	25-100	5-30	---	---	---
40	0,42	---	---	100	85-100	20-60
50	0,297	0-45	0-15	---	---	---
80	0,177	---	---	90-100	10-50	5-20
100	0,149	0-10	---	70-90	5-30	---
200	0,074	0	0-3	35-60	---	---

Como se pode verificar na Tabela 5, não existe uma receita específica para a produção de misturas betuminosas com adição de borracha. As granulometrias, a par das temperaturas, dos tempos de mistura e de digestão da borracha, não têm ainda valores fixos para a produção. A obtenção desses valores deverá passar por um processo de várias tentativas de formulação, assentes na experiência laboratorial e de campo, até que se atinja uma boa relação para tirar o maior partido possível destas misturas.

2.7. Adesividade do Inerte

Para o estudo desta dissertação, é importante perceber de que maneira o inerte vai reagir com o betume e qual a adesividade que este vai ter.

Este comportamento vai ser importante relativamente ao envelhecimento que as misturas vão ter, dado que do envelhecimento resulta o aumento da viscosidade e da rigidez,

bem como a perda de ductilidade e de adesividade entre o betume e o agregado. Como consequência, a flexibilidade diminui e o pavimento torna-se mais suscetível ao fendilhamento e consequente penetração da água que irá instabilizar as camadas não ligadas. Na degradação de pavimentos, este é o mecanismo mais comum (Pereira, 2009).

Segundo Kanitpong e Bahia, 2003, citado por Pereira (2009), “A adesividade é uma força intermolecular de atração na área de contacto entre os corpos desconhecidos que atua unindo-os. A adesividade pode ser usada para referir a quantidade de energia que é necessária para quebrar a ligação entre o betume e o agregado”.

Apesar das características do betume e do tipo de mistura poderem influenciar a sensibilidade à água de misturas betuminosas, as propriedades dos agregados são os principais responsáveis pela resistência adesiva entre o betume e o agregado (Pereira, 2009).

Muitas são as características do agregado que influenciam este fenómeno, das quais se podem destacar (Pereira, 2009):

- Porosidade e absorção;
- Composição química;
- Composição mineralógica e polaridade;
- Angularidade;
- Forma;
- Textura superficial.

Segundo Bernucci et al. (2008), “Os minerais existentes nas partículas dos agregados apresentam os átomos dispostos numa rede cristalina, onde os átomos da superfície exercem atração sobre átomos de gases líquidos ou sólidos que com ela tenham contato, promovendo a adsorção química. Essa adsorção é o principal fator na adesividade entre o agregado e os ligantes betuminosos”.

Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto que os de rochas classificadas como básicas apresentam, normalmente, melhor adesividade ao ligante asfáltico.

Na Tabela 6, estão apresentadas algumas rochas, classificadas em função da acidez, que é influenciada pela percentagem de sílica que as mesmas contêm.

Tabela 6 - Classificação de rochas quanto à acidez e ao teor de sílica (Bernucci et al., 2008)

Classificação	% Sílica	Quartzo	Exemplo
Ácido	>65	Presente	Granito, riólito, quartzito
Neutro	52 a 65	Pouco ou inexistente	Sienito, diorito
Básico	45 a 52	Raríssimo	Basalto, gabro
Ultrabásico	<45	Inexistente, feldspato escasso	Piroxenito

Como se pode verificar na tabela, a sílica é o principal fator de acidez nas rochas, alterando o pH das mesmas consoante a percentagem de sílica presente nestas. A sílica pode ser cristalina ou amorfa. Por exemplo, o vidro é composto por sílica amorfa, que advém de arranjos atômicos e sem simetria ou ordenação de longo alcance. Já o quartzo, presente no granito, surge do processo de cristalização da sílica. Neste caso, o comportamento ao nível da adesividade dos agregados provenientes de rocha granítica vai ser melhor que o comportamento dos agregados provenientes de rochas que contenham sílica amorfa.

3. ESTUDO REALIZADO

3.1.Considerações iniciais

Para analisar a influência da borracha em agregados de baixa adesividade, escolheu-se um dos agregados com maiores problemas ao nível da adesividade. No subcapítulo seguinte estão descritos os agregados existentes em Portugal segundo a distribuição dos centros de produção abrangidos pela natureza da matéria-prima utilizada na produção dos seus produtos. Este dado foi fulcral para a escolha do agregado de estudo.

Para uma boa análise ao estudo em causa, foram feitos diversos ensaios em misturas betuminosas com adição de borracha, comparando, sempre os resultados entre as misturas equivalentes com diferentes percentagens de borracha.

Neste estudo, e para que houvesse uma comparação mais fiável das diferentes misturas entre as diferentes percentagens de borracha a usar, foram fixadas as curvas granulométricas das formulações e o teor de betume a utilizar nas misturas.

3.2.Diferentes tipos de agregados

Quando se fala em misturas betuminosas, sabe-se que estas são constituídas por agregados minerais, filler e betume (InIR, 2010). Um estudo aprofundado das características dos agregados a usar nas misturas betuminosas é uma mais-valia para a escolha e dimensionamento do pavimento a usar, relativamente à utilização que o mesmo vai ter.

Neste subcapítulo, apresentam-se alguns agregados que são adotados na conceção de misturas betuminosas.

Os agregados para misturas betuminosas, segundo InIR (2010), são caracterizados, principalmente, pela granulometria, geometria, resistências, massa volúmica e absorção de água e afinidade aos ligantes betuminosos.

Em 2009, foi publicado pelo Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP (InIR) um levantamento das características dos agregados produzidos em Portugal. Neste levantamento, observa-se que a maioria dos agregados fabricados em Portugal (cerca de 39,7%) advém de rochas ígneas plutónicas das quais representam quase na sua totalidade o granito. Na Tabela 7, apresenta-se a natureza das matérias-primas utilizadas na produção dos agregados dos centros de produção em Portugal.

Tabela 7 - Distribuição dos centros de produção abrangidos pela natureza da matéria-prima utilizada na produção dos seus produtos (InIR, 2009b).

Natureza da matéria-prima		Centros de Produção	%	%
Rochas Ígneas Plutónicas	Granito	81	36,2%	39,7%
	Granodiorito	3	1,3%	
	Gabro	2	0,9%	
	Gabrodiorito	1	0,4%	
	Sienito	1	0,4%	
	Gnaisse	1	0,4%	
Materiais Aluvionares	Areia	34	15,2%	25,4%
	Seixo/areia	23	10,3%	
Rochas Carbonatadas	Calcário	50	22,3%	25,0%
	Mármore	4	1,8%	
	Dolomito	2	0,9%	
Rochas Ígneas Vulcânicas	Basalto	19	8,5%	9,4%
	Riólito/Dacito	2	0,9%	
Outras	Grauvaque	1	0,4%	0,8%
	Barite	1	0,4%	
Total		224	100%	

Estes são os agregados produzidos nos centros de produção portugueses, não querendo isto significar que todos eles são usados na conceção de misturas betuminosas.

Quanto à dimensão do agregado, em Portugal, a classificação das partículas é a seguinte (Fontes, 2009):

- Brita é o material cujo diâmetro equivalente (d_{eq}) é superior a 30 mm e inferior a 150 mm;
- Murraça são as partículas de diâmetro equivalente compreendido entre 15 mm e 30 mm;
- Gravelha corresponde ao material granular cujas partículas têm um valor de diâmetro equivalente entre 5 mm e 15 mm;
- Agregado fino é o material cujo diâmetro equivalente é inferior ou igual a 5 mm;

- Filler corresponde às parcelas das partículas que têm um diâmetro equivalente inferior a 0,07 mm.

Por fim, os agregados podem classificar-se por granulometria e, segundo o InIR (2010), eles podem-se agrupar por:

- Filler;
- Agregado fino;
- Agregado grosso;
- Agregado de granulometria extensa.

Um bom conhecimento das propriedades dos agregados a usar nas misturas betuminosas, tais como a resistência ao desgaste, é essencial para o desempenho do pavimento (Janoo & Korhonen, 1999).

Na Tabela 8, pode-se observar as principais propriedades dos agregados que afetam o comportamento das misturas betuminosas, tais como as recomendações que existem para não surgirem patologias nos pavimentos oriundos de agregados com valores desadequados das mesmas propriedades.

Tabela 8 - Propriedades dos agregados que afetam as misturas betuminosas (Fontes, 2009).

Propriedades	Afeta propriedades das misturas betuminosas	Recomendação
Forma	Estabilidade mecânica, imbricamento, atrito interno. Quebra durante a produção, compactação e confecção das misturas.	Utilização de agregados cúbicos e angulares ao invés de arredondados e lamelares.
Dureza	Resistência ao desgaste, esmagamento, desagregação e desintegração.	Utilização de agregados duros e resistentes.
Durabilidade	Quebra e desintegração.	Utilização de agregados resistentes.
Sensibilidade à água	Adesividade agregado-betume.	Utilização de agregados livres de materiais finos ou argila, natureza mineralógica.
Limpeza	Adesividade agregado-betume.	Utilização de agregados livres de materiais finos ou argila.
Massa Volúmica	Relacionados à constituição das partículas dos agregados: densas ou impermeáveis; mais ou menos porosas.	Utilização de agregados com baixa baridade resulta em misturas menos resistentes.

Para o caso em estudo, e analisando todos os dados de pesquisa feitos anteriormente, optou-se, então, por estudar o comportamento do seixo (Godo) com adição de granulado de borracha. Este agregado será utilizado com diferentes percentagens de borracha, a fim de obter resultados sobre o comportamento que o mesmo terá com a ação da borracha.

Escolheu-se, portanto, o seixo para este estudo, pois é um dos agregados mais utilizados em Portugal, sendo só ultrapassado pelo calcário. Devido às propriedades de forma e de dureza que o calcário tem, este não pode ser usado em camadas de desgaste, que é a camada onde este estudo vai incidir, já que a borracha só é adicionada em camadas de desgaste.

O seixo é um material de baixa adesividade, devido à sua forma e à grande percentagem de sílica existente na sua composição.

3.3. Metodologia dos Trabalhos

Como foi relatado atrás, a primeira fase de trabalhos incidiu na seleção do material a usar para o estudo, sendo escolhido como agregado das misturas o seixo.

Depois da escolha dos agregados em análise, estes foram caracterizados. Para o estudo foram usados godo 4/11, godo 11/16 e pó de pedra, apresentados nas figuras seguintes.



Figura 11 - Pó de pedra (foto do autor)



Figura 12 - Godo 4/11 (foto do autor)



Figura 13 - Godo 11/16 (foto do autor)



Figura 14 - Cal hidráulica (Filler) (foto do autor)

Nas imagens, verifica-se que o godo 4/11 é composto por seixo rolado, enquanto que o godo 11/16 é composto por seixo britado.

A caracterização dos materiais foi feita quanto à forma e à massa volúmica. Para isso, fez-se uma análise granulométrica dos agregados minerais e do granulado de borracha a usar nas misturas, e para que fosse possível obter o teor de betume a utilizar nas formulações, foram calculadas laboratorialmente as massas volúmicas desses mesmos agregados minerais.

Com o objetivo de obter resultados fiáveis, fizeram-se diferentes misturas de análise, tendo-se fixado em todas elas o mesmo teor de betume e a mesma curva granulométrica.

Para alcançar conclusões sobre o efeito que a borracha terá em misturas betuminosas com adição de borracha, foram feitos diversos ensaios, com diferentes percentagens de betume.

Assim sendo, as formulações foram avaliadas ao nível da influência da borracha em misturas betuminosas com seixo, ensaiando a adesividade betume-agregado, a suscetibilidade à água/resistência conservada e a baridade.

Para que estes ensaios fossem possíveis, houve necessidade de consultar várias normas relativas aos ensaios. Para os agregados utilizaram-se as Normas Europeias, que estão divididas em cinco grupos, sendo cada grupo correspondente a um conjunto de ensaios a uma propriedade diferente do agregado. Em cada grupo existe um conjunto de normas, referentes a cada ensaio.

Na Tabela 9, estão referenciadas as normas que foram utilizadas para caracterização dos agregados usados.

Tabela 9 - Normas utilizadas para as propriedades dos agregados

Norma	Propriedades dos agregados
NP EN 933-1:2000	Análise granulométrica. Método de Peneiração
NP EN 933-2:1999	Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas.
NP EN 1097-6:2003	Determinação da massa volúmica e absorção de água.

3.3.1. Análise Granulométrica

Para analisar granulometricamente os agregados, seguiu-se o procedimento descrito na norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000) sobre ensaios das propriedades geométricas dos agregados.

3.3.1.1. Granulometria de agregados minerais

O ensaio de análise granulométrica para os agregados minerais consiste na separação, com recurso a um conjunto de peneiros, em diferentes classes granulométricas, por ordem decrescente.



Figura 15 – Peneiro de rede metálica e de chapa perfurada (foto do autor)

Primeiramente é feita a lavagem do material e de seguida é secado em estufa a 110 ± 5 °C. Depois de seco, é retirada uma amostra pesada, de acordo com a norma, e esta é passada pelo conjunto de peneiros. O conjunto de peneiros, segundo a norma NP EN 933-2 (IPQ, 1999) é constituído por peneiros de abertura apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensão nominal da abertura dos peneiros de malha quadrada

Abertura (mm)											
125	63	31,5	16	8	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063

Após a pesagem do material retido em cada peneiro, pode-se, então, retirar as curvas granulométricas de cada agregado mineral, e assim fazer as formulações para os grupos em estudo. Como um dos parâmetros a fixar nestas formulações é a granulometria, esta foi ajustada por forma a cumprir os fusos (que irão ser falados mais a frente nesta dissertação) para as diferentes percentagens de borracha.

A diferença entre a massa total da amostra após peneiração e a massa seca da amostra após lavagem deve ser inferior a 1 %, de modo a que a perda de material durante o ensaio não seja significativa.

As curvas granulométricas dos agregados a utilizar nas misturas estão apresentadas no Anexo I, na página i dos anexos.

A formulação conseguida e usada para o estudo é apresentada na Tabela 11, cumprindo o fuso adotado segundo o caderno de encargos da EP (2012), para MBR-BBM (Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com média percentagem de borracha).

Tabela 11 - Formulação de Seixo

Peneiros (mm)	Godo 4/11		Godo 11/16		Pó de pedra		Filler		Curva da mistura	Fuso adotado
	Granu.	17%	Granu.	38%	Granu.	42%	Granu.	3%		
63,000	100,0	17,0	100,0	38,0	100,0	42,0	100,0	3,0	100,0	-
31,500	100,0	17,0	100,0	38,0	100,0	42,0	100,0	3,0	100,0	100
16,000	100,0	17,0	100,0	38,0	100,0	42,0	100,0	3,0	100,0	100
8,000	97,2	16,5	32,2	12,2	100,0	42,0	100,0	3,0	73,8	62-82
4,000	8,3	1,4	12,5	4,8	93,3	39,2	100,0	3,0	48,3	-
2,000	0,9	0,2	7,7	2,9	65,7	27,6	100,0	3,0	33,7	25-35
1,000	0,5	0,1	5,5	2,1	45,4	19,1	100,0	3,0	24,2	-
0,500	0,4	0,1	4,3	1,6	31,9	13,4	100,0	3,0	18,1	12-22
0,250	0,3	0,1	3,3	1,3	21,7	9,1	100,0	3,0	13,4	-
0,125	0,3	0,1	2,4	0,9	14,6	6,1	100,0	3,0	10,1	-
0,063	0,3	0,0	1,6	0,6	9,4	4,0	90,8	2,7	7,3	7-9

Na Figura 16, é apresentada a curva granulométrica da formulação em estudo, onde se pode ver, também, o fuso adotado.

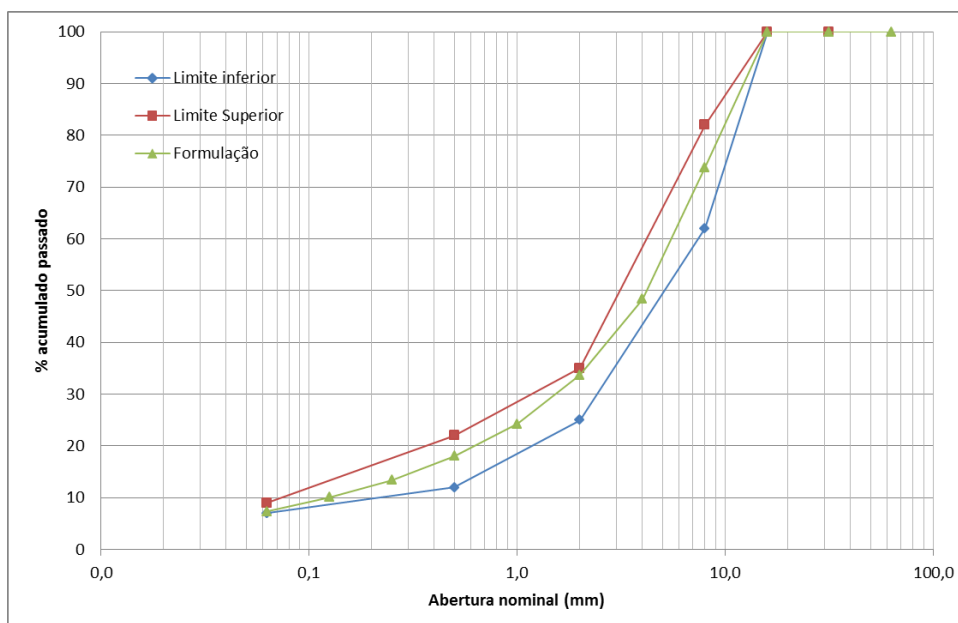


Figura 16 - Curva granulométrica da formulação e fuso adotado

3.3.1.2. Granulometria da borracha

Para este estudo, a mistura betuminosa terá uma adição de borracha para além da mistura que iremos efetuar. Sendo assim, a granulometria da borracha será apenas um dado de caracterização do material e não um dado de cálculo para a formulação. Como a borracha vai interagir com o betume, haverá um pequeno acréscimo do material ligante, não querendo isto dizer que a quantidade de betume usado será maior. Ou seja, a quantidade de betume colocada na mistura é a mesma, mas a quantidade de material ligante em si será um pouco superior, devido ao acréscimo do granulado de borracha.

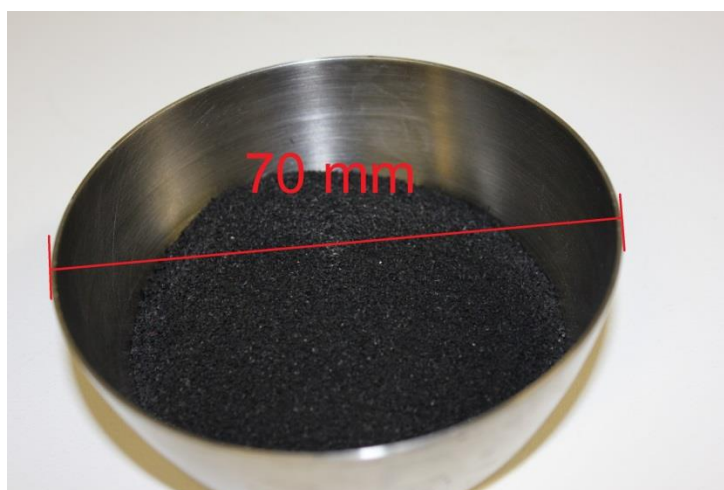


Figura 17 - Granulado de borracha usado (foto do autor)

A granulometria da borracha é dada pelo fornecedor do material e tem de respeitar o fuso indicado no Caderno de Encargos (EP, 2012), apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Fuso granulométrico do granulado de borracha (EP, 2012)

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (mm) EN 933-2	Percentagem acumulada de material que passa (%)
1,18	100
1	98 – 100
0,5	60 – 94
0,25	5 – 25
0,063	0 - 3

O granulado de borracha utilizado neste estudo foi obtido por trituração mecânica ambiental a partir de pneus em fim de vida, com granulometria entre 0,0 mm e 0,8 mm.

3.3.2. Massas Volúmicas

Outro parâmetro de caracterização dos materiais é a massa volúmica dos mesmos. Para este ensaio seguiu-se a norma NP EN 1097-6 (IPQ, 2003).

Nesta avaliação, será possível calcular a absorção de água dos agregados, que consiste na quantidade de água que um agregado é capaz de absorver quando está em contacto com a mesma.

A massa volúmica das partículas é calculada a partir da relação entre a massa e o volume. “A massa é determinada pela pesagem do provete com as partículas saturadas com superfície seca e a partir de outra pesagem do mesmo provete após secagem em estufa. O volume é determinado a partir da massa da água deslocada, quer pela redução de massa no método do cesto de rede metálica, quer por pesagens no método do picnómetro”, segundo a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2003).

A determinação das massas volúmicas dos agregados é essencial neste estudo, para que se possa calcular a baridade máxima teórica das mesmas. Devido a algumas restrições do laboratório, optou-se por fazer dois tipos de análise: aos agregados que passaram no peneiro nº 4, foi feita uma análise quanto à sua massa volúmica pelo método do picnómetro (como foi o caso do pó de pedra); nos agregados que ficaram retidos acima do peneiro nº 4, utilizou-se o método do cesto de rede metálica. No caso dos dois agregados de seixo, como tinham uma percentagem considerável que passava no peneiro nº 4, optou-se por peneirar o material com o peneiro nº 4, fazendo-se, assim, os dois métodos. No final, fez-se uma média ponderada relativamente às percentagens passadas e retidas no peneiro nº 4, de forma a obter as massas volúmicas do material.

Feita esta diferenciação, para tirar todas as conclusões possíveis neste ensaio, pesaram-se os seguintes parâmetros necessários segundo a norma:

- M_1 – massa do agregado saturado com superfície seca ao ar;
- M_2 – massa aparente do cesto contendo o provete de agregado saturado, imerso em água;
- M_3 – massa aparente do cesto vazio imerso em água;
- M_4 – massa no ar do provete seco em estufa.

Através destes valores foi possível calcular as seguintes informações relativas aos agregados:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a ;

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (1)$$

- Massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd} ;

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (2)$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd} ;

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad (3)$$

- Absorção de água (em percentagens da massa seca), W_{24} .

$$W_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4)$$

Todos os dados relativos às massas volúmicas e absorção de água dos agregados encontram-se especificados no Anexo II, na página ix dos anexos, e encontram-se em resumo nas tabelas seguintes:

Tabela 13 - Resultados do ensaio de determinação da massa volúmica para o pó de pedra

Método de ensaio	Identificação do agregado	Resultados
EN 1097-6 Determinação da massa volúmica e da absorção de água	Pó de pedra	ρ_a (g/cm ³)
		2,65
		ρ_{rd} (g/cm ³)
		2,64
		ρ_{ssd} (g/cm ³)
		2,64
		W_{24} (%)
		0,11

Tabela 14 - Resultados do ensaio de determinação da massa volúmica para o Seixo 4/11

Método de ensaio	Identificação do agregado	Resultados
EN 1097-6 Determinação da massa volúmica e da absorção de água	Seixo 4/11	ρ_a (g/cm ³)
		2,62
		ρ_{rd} (g/cm ³)
		2,54
		ρ_{ssd} (g/cm ³)
		2,57
		W_{24} (%)
		1,18

Tabela 15 - Resultados do ensaio de determinação de massa volúmica para o Seixo 11/16

Método de ensaio	Identificação do agregado	Resultados
EN 1097-6 Determinação da massa volúmica e da absorção de água	Seixo 11/16	ρ_a (g/cm ³) 2,63
		ρ_{rd} (g/cm ³) 2,56
		ρ_{ssd} (g/cm ³) 2,59
		W_{24} (%) 0,97

3.3.3. Formulações de estudo

Para o estudo da influência da natureza do agregado numa mistura com adição de borracha, escolheu-se previamente um agregado de baixa adesividade, nomeadamente um godo. Este tipo de agregado é um dos mais usados, em Portugal, em misturas betuminosas aplicadas a camadas de desgaste.

A formulação deste agregado sem borracha será comparada com o uso da mesma formulação, mas com diferentes percentagens de borracha. Estas percentagens a usar serão adicionadas sem que se altere a curva granulométrica das misturas e o teor de betume das mesmas.

Para o estudo em causa, optou-se pela comparação de três grupos de formulações de misturas betuminosas, apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Formulações de misturas betuminosas para estudo.

Agregado	Seixo
Percentagem de Borracha	0%
	10%
	20%

Para uma maior facilidade na organização dos resultados, as formulações estão numeradas como descrito na Tabela 17.

Tabela 17 - Grupos de misturas em estudo

Grupo	Material	Percentagem de borracha
1	Seixo	0%
2	Seixo	10%
3	Seixo	20%

3.3.4. Teor de Betume

Um dos parâmetros falados atrás que iriam ser fixados para todas as formulações seria o teor de betume. Assim sendo, e como a curva granulométrica da mistura é igual para todas as formulações, optou-se por achar a quantidade de betume a usar através de uma fórmula de aproximação relacionada com a dimensão dos agregados utilizados.

A fórmula usada para determinação do teor de betume foi a Fórmula de *Duriez* (Equação 5).

$$Pb = K \cdot F \cdot \sqrt[5]{Se} \quad (5)$$

em que:

Pb – a percentagem de betume residual;

K – é o módulo de riqueza em betume;

$F = \frac{2,65}{\rho_a}$, sendo ρ_a , em g/cm^3 , a massa volúmica da mistura de agregados;

$$Se = \frac{1}{100} (0,25 S_1 + 2,3 S_2 + 12 S_3 + 135 f_1); \quad (6)$$

em que:

Se – superfície específica;

S_1 – proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm;

S_2 – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 6,3 e 0,315 mm;

S_3 – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 e 0,075 mm;

f_1 – proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075 mm.

Posto isto, usando a curva granulométrica do seixo e um K de 3,3, calculou-se o teor de betume para a massa volúmica da formulação.

Na Figura 18, pode-se ver a curva granulométrica da formulação, com a correspondência às percentagens acumuladas passadas relativas aos peneiros referidos na Fórmula de *Duriez*.

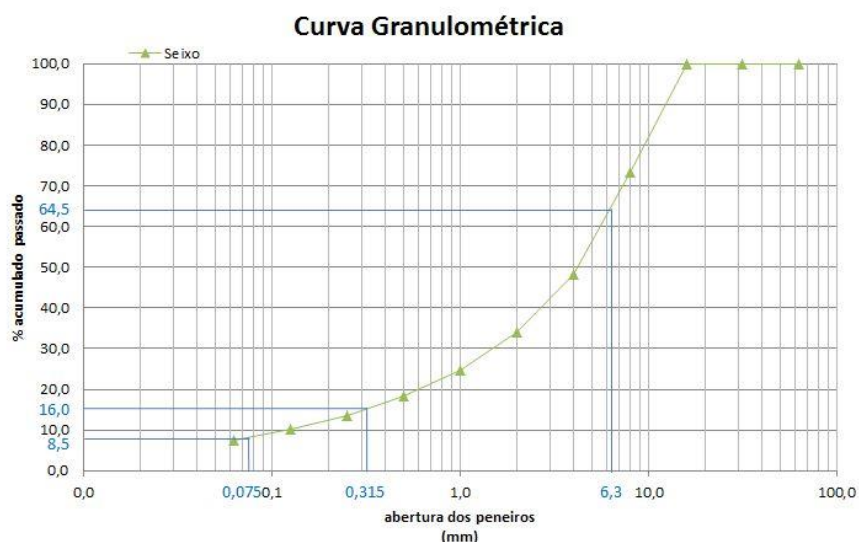


Figura 18 - Curva granulométrica correspondente à formulação a usar para uso da Fórmula de *Duriez*

Com os valores apontados na curva granulométrica, foi possível retirar os valores das proporções a usar na Fórmula de *Duriez*.

Na Tabela 18, está apresentado o teor de betume para a formulação de seixo.

Tabela 18 - Teor de betume para a formulação de Seixo

A	K	S ₁	S ₂	S ₃	f ₁	Se	Pb
1,0	3,3	35,5	48,5	7,5	8,5	13,58	5,59%

De acordo com o valor apresentado, o teor ótimo de betume a usar nas formulações é de aproximadamente 5,6%, tendo sido adotado para a produção de provetes no ensaio de resistência conservada.

3.3.5. Resistência Conservada e Suscetibilidade à Água

A resistência das misturas betuminosas à ação da água é uma das características mais importantes nos pavimentos rodoviários, diretamente relacionada com o desempenho e a durabilidade deste tipo de materiais durante a vida útil do pavimento (InIR, 2009a). Este fator é ainda mais importante quando se trata de misturas para camadas de desgaste.

Segundo Batista et al. (2008), a ação da água sobre as misturas betuminosas está associada, de uma forma geral, a dois mecanismos de degradação da mistura betuminosa:

perda de adesividade entre o betume e o agregado; a perda de coesão e de resistência do betume. A sensibilidade à água é uma propriedade das misturas betuminosas, habitualmente avaliada na sua formulação, e para a qual são estabelecidos valores mínimos a cumprir nos Cadernos de Encargos de acordo com o método de ensaio utilizado para a sua avaliação.

A avaliação desta propriedade, em Portugal, é tradicionalmente feita através da Norma Americana MIL – STD – 620A, que determina o cálculo do Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios Marshall. Mais tarde, e com o aparecimento das normas europeias, surgiu a norma EN 12697-12: (CEN, 2003) que prevê o cálculo da resistência conservada em ensaios de tração indireta. O facto de Portugal ainda não ter experiência com a resistência conservada em ensaios de tração indireta, a norma NP EN 13108-1 (IPQ, 2011b) – Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais: Parte 1 – Betão Betuminoso, recomenda a determinação da resistência conservada através da norma americana.

Assim, e como vai ser descrito em seguida, foram feitos provetes de ensaio segundo o ensaio de Marshall.

Foram feitos 6 provetes para cada mistura, num total de 18 provetes. Em todas as formulações foi fixada a granulometria pela curva granulométrica descrita atrás.

As proporções de cada agregado foram aquecidas a uma temperatura entre 150°C a 170°C e o betume aquecido a uma temperatura entre 160 a 180°C. De seguida, colocou-se os agregados num recipiente com manta de aquecimento, garantindo, assim, temperaturas a rondar os 150°C, como pode ser visto na Figura 19.



Figura 19 - Mistura de agregados para produção de provete de ensaio (foto do autor)



Figura 20 - Adição de betume à mistura (foto do autor)

Com auxílio de uma balança, adicionou-se a quantidade de betume a usar (Figura 20) e, com uma pá, pré misturou-se a mistura até os agregados ficarem minimamente envolvidos no betume. Depois, e com recurso a uma misturadora, misturou-se novamente a composição durante 2 minutos (Figura 21). Posteriormente, a mistura é colocada no molde Marshall e o provete é compactado na máquina de compactação com 50 pancadas de cada lado (Figura 22).



Figura 21 – Misturadora (foto do autor)



Figura 22 - Máquina de compactação (foto do autor)

Para finalizar, o provete é colocado em banho-maria a 40°C, por mais 2 minutos, e, após esse tempo, o provete é retirado do molde com auxílio de um macaco hidráulico (Figura 23). Ao retirar o provete, este é identificado, para não causar confusão quanto à origem de cada provete (Figura 24).



Figura 23 - Desmolde do provete (foto do autor)



Figura 24 - Provete produzidos (foto do autor)

Num ensaio de Marshall, os provetes seriam colocados em banho-maria a 60°C, durante 20 minutos. O procedimento de ensaio para a resistência conservada é igual ao procedimento usado em Marshall, com a diferença que foram feitos dois grupos de 3 provetes para cada

formulação. O primeiro grupo ficou 30 minutos em banho-maria a 60°C e o segundo grupo ficou 24 horas em banho-maria a 60°C. Deste modo, foi possível analisar o comportamento das misturas à ação da água. De seguida, os provetes foram colocados no estabilómetro montado na máquina de compressão, à qual foi imposta uma velocidade de 50 mm/min, até os provetes atingirem a rotura (Figura 25). Para uma leitura mais rigorosa dos resultados de ensaio, foi instalada uma câmara de alta resolução que filmou todas as compressões.



Figura 25 – Máquina de compressão pronta para ensaio (foto do autor)

Com os resultados obtidos, foi possível calcular as baridades médias aparentes, e máximas teóricas dos provetes, porosidade, volume de vazios e, por fim, estabilidade e deformação das diferentes misturas betuminosas.



Figura 26 - Pesagem provete seco (foto do autor)



Figura 27 – Pesagem provete imerso (foto do autor)

Verificando o peso seco e imerso de cada provete, calculou-se a baridade aparente dos provetes. Com este dado, foi possível agrupar os provetes por ensaio para que os 3 grupos de cada formulação em média tivessem a mesma baridade (Figura 26 e Figura 27).

Para uma melhor análise de resultados, os provetes foram agrupados segundo a média da baridade dos mesmos, para que pudesse haver médias equivalentes entre os grupos, e

próximas da média de todos os provetes. Os provetes foram agrupados para os dois ensaios (Resistência Conservada 30min e Resistência Conservada 24h) segundo a baridade média dos provetes. Assim sendo, todos os grupos da mesma formulação têm baridade média próxima.

Finalizou-se o processo medindo, com recurso a uma craveira, as dimensões dos provetes, para garantir que o diâmetro dos mesmos seja de 101 mm e a altura aproximadamente 63 mm.



Figura 28 - Provetes para ensaio de Resistência Conservada (foto do autor)

Como foi referenciado atrás nesta dissertação, as formulações de ensaio são três: formulação sem borracha; formulação com 10% de borracha; formulação com 20% de borracha.

Devido a algumas divergências ao nível dos resultados, que serão melhor explicados no capítulo referente aos resultados e análise dos ensaios, houve a necessidade de prolongar o tempo em que os provetes se encontravam em banho-maria (Figura 29). Isto vai causar uma maior ação por parte da água nos provetes, na tentativa de provocar um maior envelhecimento nos mesmos.



Figura 29 - Provetes em banho-maria a 60°C (foto do autor)

Posto isto, fez-se mais dois grupos de provetes: num os provetes foram sujeitos à ação da água à temperatura de 60°C, durante 48 horas, e noutro foram sujeitos à mesma ação durante 72 horas.

Deste modo, agruparam-se os provetes, que são visíveis na Figura 28, segundo o esquema apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Identificação e distribuição dos provetes pelos ensaios

Identificação da mistura	Identificação dos provetes											
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12
Seixo 0% de borracha												
Seixo 10% de borracha												
Seixo 20% de borracha												

 Resistência conservada 30min	 Resistência conservada 24h	 Resistência conservada 48h	 Resistência conservada 72h
--	--	--	--

Com este ensaio, calculou-se o IRC (Índice de Resistência Conservada) de cada formulação, analisando, assim, a suscetibilidade que cada formulação vai ter com a ação da água. Com o fabrico dos provetes de análise a 48 horas e 72 horas, foi possível ver o envelhecimento dos provetes ao longo do tempo, com 4 pontos de análise.

3.3.6. Adesividade betume-agregado

A adesividade betume-agregado consiste na verificação do descolamento de uma película de betume envolvente a um inerte, provocado pela ação da água destilada em determinadas condições (J.A.E, 1953).

Para além de se ensaiar os godos usados na formulação, também se utilizou uma brita granítica. Como o granito é um agregado com melhores comportamentos ao nível da adesividade relativamente ao seixo, este foi usado para ser comparado com o comportamento do seixo.

Para obter resultados referentes à adesividade betume-agregado da brita e godos utilizados, optou-se por seguir a norma para determinação da adesividade betume-inerte da Junta Autónoma de Estradas, P. 9-53 (J.A.E, 1953).

Para a mistura de uma fração de agregados e de uma percentagem de betume, ambos estipulados pela norma J.A.E (1953), o ensaio adesividade betume-inerte pretende a verificação visual da percentagem de inerte sem betume, visível após a colocação da mistura em água destilada durante dois ciclos. No primeiro ciclo, a mistura é colocada durante 24 horas em água destilada à temperatura ambiente. No segundo ciclo, metade da mistura anterior é colocada durante mais 3 horas em água destilada à temperatura de 60°C.

Segundo a norma utilizada (Tabela 20), a massa da amostra a ensaiar depende da máxima dimensão do agregado determinado na análise granulométrica. De acordo com a análise feita, a máxima dimensão é de 16mm, ou seja, o último peneiro com 100% de material passado é o peneiro 5/8'', para todos os agregados em estudo.

Tabela 20 - Peso da amostra no ensaio (J.A.E, 1953)

Máxima dimensão do inerte determinado pelos peneiros	Massa da amostra (g)
nº 4 ou inferior	500
3/8''	800
1/2''	1000
3/4''	1500
1 ou superior	2500

De acordo com a Tabela 20, considerou-se, para os três tipos de agregados (godo rolado, godo britado e brita granítica), a utilização de uma massa de amostra de 1000g.

Para determinar a quantidade de betume a usar no ensaio, a norma especifica a aproximação do mesmo através do cálculo da superfície específica de cada agregado, através da Equação 7:

$$\Sigma = 0,17a + 0,33b + 0,71c + 5d + 135e \quad (7)$$

Sendo:

Σ =superfície específica, em metros quadrados por quilograma;

a=percentagem do inerte retido no peneiro 3/8”;

b=percentagem do inerte passado no peneiro 3/8” e retido no peneiro nº 4;

c=percentagem do inerte passado no peneiro nº 4 e retido no peneiro nº 10;

d=percentagem do inerte passado no peneiro nº 10 e retido no peneiro nº 200;

e=percentagem do inerte passado no peneiro nº 200.

Com o valor da superfície específica, calculou-se a quantidade de betume a usar, através da seguinte Equação 8:

$$p_b = 0,035 \times \sqrt[5]{\Sigma} \times p_i \quad (8)$$

Sendo:

p_b =peso do betume a misturar com o inerte, em gramas;

Σ =superfície específica, em metros quadrados por quilograma;

p_i =peso do inerte determinado anteriormente, em gramas.

Para o caso em estudo, foi ensaiada uma brita granítica 6/12, o seixo 4/11 e seixo 11/16, que foram usados na formulação.

Como foi utilizado um novo material para este estudo, este foi também analisado quanto à granulometria e massa volúmica pelos processos explicados anteriormente nesta dissertação. Os resultados destes ensaios encontram-se em anexo. No Anexo 1 apresenta-se a granulometria do material e no Anexo 2 os resultados referentes à massa volúmica.

Como a série de peneiros usada nas análises granulométricas não contém alguns dos peneiros referidos na norma, fez-se uma aproximação das proporções indicadas na fórmula de cálculo para a superfície específica, através das curvas granulométricas de cada agregado.

Tal é demonstrado nas figuras seguintes.

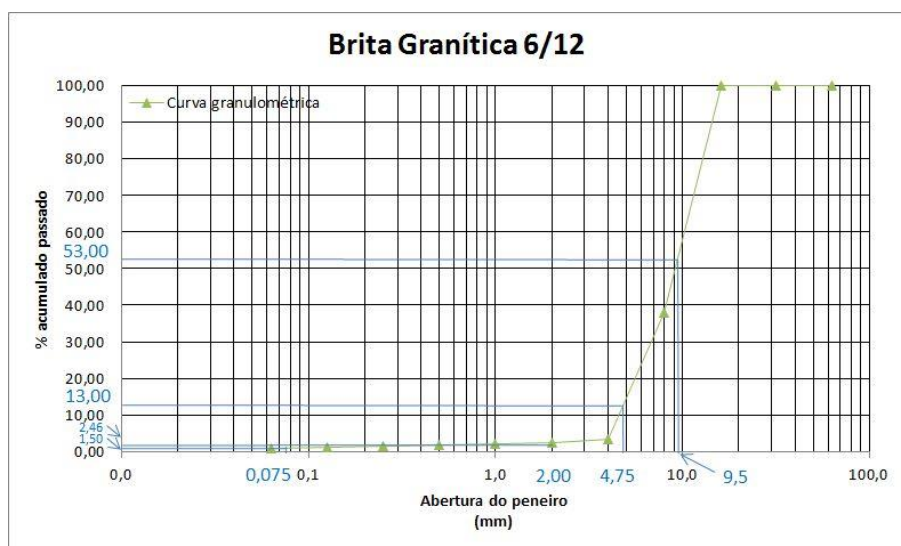


Figura 30 - Proporções granulométricas brita 6/12

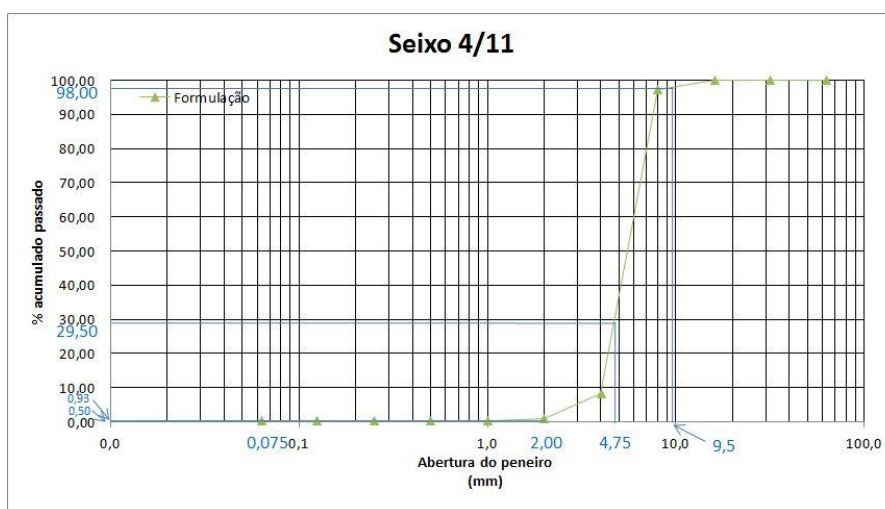


Figura 31 - Proporções granulométricas Seixo 4/11

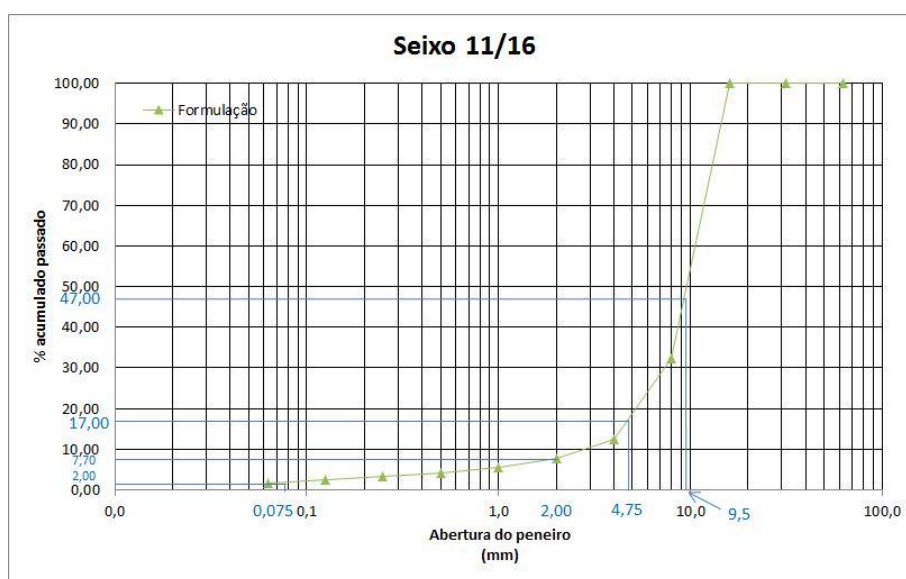


Figura 32 - Proporções granulométricas Seixo 11/16

Na Tabela 21, são indicadas as proporções e os valores da superfície específica de cada agregado e as quantidades de betume a usar em cada ensaio.

Tabela 21 - Quantidades para ensaio de adesividade betume-inerte

Agregados	a	b	c	d	e	Σ	pb
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(m ² /Kg)	(g)
Brita granítica 6/12	47,00	40,00	10,54	0,96	1,50	2,36	41,56
Seixo 4/11	2,00	68,5	28,57	0,43	0,5	1,13	35,86
Seixo 11/16	53,00	30,00	9,30	5,70	2,00	3,24	44,28

Depois de se obter as frações necessárias de cada brita e godo para o ensaio, estas foram aquecidas a uma temperatura de cerca de 170°C, ao mesmo tempo que o betume foi aquecido até aos 175°C. Atingidas as temperaturas, misturou-se o betume na quantidade determinada anteriormente com cada agregado.

As misturas obtidas foram colocadas em tabuleiros, de forma a ganhar uma camada horizontal sem compactar, e deixadas a arrefecer em repouso até à temperatura ambiente. De seguida, deitou-se água destilada até cobrir totalmente as misturas (Figura 33).



Figura 33 - Misturas cobertas com água destilada (foto do autor)

As misturas cobertas com água destilada ficaram em repouso durante 24 horas. Após esse tempo, retirou-se do tabuleiro metade da mistura e registou-se a percentagem da superfície do inerte sem betume.

A outra metade da mistura continuou imersa em água destilada aquecida a 60°C durante 3 horas. Ao fim desse tempo, voltou-se a fazer o registo da percentagem da superfície do inerte sem betume.

Para o ensaio, além da análise dos três agregados sem borracha, também se realizou a análise para os mesmos tipos de agregados com 10% e 20% de borracha.

Na Tabela 22, estão apresentadas as composições analisadas neste ensaio.

Tabela 22 - Composições de ensaio à adesividade betume-agregado

Agregados em análise	Brita granítica 6/12	Seixo 4/11	Seixo 11/16
% de borracha	0%	0%	0%
	10%	10%	10%
	20%	20%	20%

Com este ensaio, pretendeu-se verificar as diferenças existentes ao nível da adesividade nos diferentes agregados utilizados e comparar, também, as diferentes percentagens de borracha utilizadas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1. Análise dos resultados dos ensaios de Resistência Conservada e de Sensibilidade à água

Para a avaliação da resistência conservada foram realizados 6 provetes para cada formulação. Os provetes foram produzidos pelo método Marshall e agrupados pela baridade, para se obter uma melhor fiabilidade nos resultados, ou seja, os provetes foram escolhidos para que cada grupo tivesse a mesma baridade média. A divisão foi feita em dois grupos com 3 provetes para cada um, sendo que num grupo os provetes, antes de serem ensaiados na máquina de compressão, foram colocados em banho-maria a 60°C durante 30 minutos e no outro os provetes foram colocados em banho-maria a 60°C durante 24 horas.

Com base nos resultados obtidos em cada grupo dos provetes, foi calculado o valor médio da força de rotura nas diferentes formulações. Comparando os valores médios de força de rotura dos provetes colocados em água a 60°C durante 30 minutos com os provetes colocados em água a 60°C durante 24 horas, foi calculada a resistência conservada das diferentes formulações (Equação 9).

$$IRC = \frac{F_2}{F_1} \times 100 \quad (9)$$

em que:

IRC – Índice de Resistência Conservada;

F_1 – Valor médio da força de rotura do grupo de provetes imersos em água durante trinta minutos;

F_2 – Valor médio da força de rotura do grupo de provetes imersos em água durante vinte e quatro horas.

Nas páginas seguintes, serão apresentados os resultados referentes a cada provete de cada formulação. Os resultados estão agrupados em diferentes tabelas, dependendo da formulação e do tempo que os provetes estiveram em banho-maria.

Os provetes das formulações de seixo imersos em água durante 30 minutos são apresentados da Tabela 23 à Tabela 25.

Tabela 23 - Características da formulação sem borracha (30min)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		1.1	1.3	1,5
Seixo com 0% de Borracha	Altura média (mm)	63,1	62,8	62,9
	Massa provete seco (g)	1193,8	1199,6	1196,7
	Massa Provete imerso (g)	694,0	662,6	678,3
	Baridade (g/cm ³)	2,389	2,234	2,311
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,451	2,451	2,451
	Força de Rotura (kN)	15,46	18,35	16,91
	Deformação (mm)	5,76	5,07	5,42

Tabela 24 - Características da formulação com 10% de borracha (30min)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		2.4	2.5	2.6
Seixo com 10% de Borracha	Altura média (mm)	65,6	65,9	66,9
	Massa provete seco (g)	1204,80	1203,30	1201,30
	Massa Provete imerso (g)	689,60	689,20	684,50
	Baridade (g/cm ³)	2,339	2,341	2,324
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,432	2,432	2,432
	Força de Rotura (kN)	14,655	13,199	12,020
	Deformação (mm)	5,31	5,34	4,75

Tabela 25 - Características da formulação com 20% de borracha (30min)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		3.1	3.2	3.3
Seixo com 20% de Borracha	Altura média (mm)	66,3	66,7	67,7
	Massa provete seco (g)	1203,00	1206,10	1208,90
	Massa Provete imerso (g)	683,50	683,10	677,70
	Baridade (g/cm ³)	2,316	2,306	2,276
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,414	2,414	2,414
	Força de Rotura (kN)	13,292	13,084	10,402
	Deformação (mm)	4,56	5,04	3,98

Os resultados dos provetes das formulações de seixo imersos em água durante 24 horas são apresentados da Tabela 26 à Tabela 28.

Tabela 26 - Características da formulação sem borracha (24h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		1.2	1.4	1,6
Seixo com 0% de Borracha	Altura média (mm)	63,1	63,6	63,3
	Massa provete seco (g)	1190,10	1188,00	1189,05
	Massa Provete imerso (g)	690,90	688,40	689,65
	Baridade (g/cm ³)	2,384	2,378	2,381
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,451	2,451	2,451
	Força de Rotura (kN)	17,021	16,320	15,618
	Deformação (mm)	4,91	5,10	5,01

Tabela 27 - Características da formulação com 10% de borracha (24h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		2.1	2.2	2.3
Seixo com 10% de Borracha	Altura média (mm)	65,4	65,3	65,6
	Massa provete seco (g)	1210,70	1200,90	1200,90
	Massa Provete imerso (g)	694,00	685,80	685,60
	Baridade (g/cm^3)	2,343	2,331	2,330
	Baridade máxima teórica (g/cm^3)	2,432	2,432	2,432
	Força de Rotura (kN)	13,869	12,529	14,979
	Deformação (mm)	4,85	4,85	4,70

Tabela 28 - Características da formulação com 20% de borracha (24h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		3.4	3.5	3.6
Seixo com 20% de Borracha	Altura média (mm)	67,0	66,8	65,6
	Massa provete seco (g)	1210,80	1207,60	1207,70
	Massa Provete imerso (g)	682,10	682,60	682,90
	Baridade (g/cm^3)	2,290	2,300	2,301
	Baridade máxima teórica (g/cm^3)	2,414	2,414	2,414
	Força de Rotura (kN)	12,899	12,760	13,453
	Deformação (mm)	6,15	4,22	4,22

Por força dos resultados obtidos, repetiu-se o mesmo ensaio, mas para provetes que ficaram em banho-maria durante 48 horas e 72 horas, para assim causar uma maior ação da água a 60°C, provocando um maior envelhecimento às misturas betuminosas.

Esta decisão foi motivada pela divergência existente nos resultados. Existe um aumento de resistência Conservada nos provetes com borracha. Este efeito será melhor explicado e representado mais à frente neste capítulo.

Em seguida, da Tabela 29 à Tabela 31, são apresentados os resultados obtidos nos provetes sujeitos à ação da água a 60°C durante 48 horas.

Tabela 29 - Características da formulação sem borracha (48h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		1.8	1.11	1.12
Seixo com 0% de Borracha	Altura média (mm)	64,4	64,3	64,0
	Massa provete seco (g)	1196,50	1197,90	1195,80
	Massa Provete imerso (g)	689,50	690,00	690,20
	Baridade (g/cm ³)	2,360	2,359	2,365
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,451	2,451	2,451
	Força de Rotura (kN)	16,851	14,933	16,320
	Deformação (mm)	5,49	4,39	5,21

Tabela 30 - Características da formulação com 10% de borracha (48h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		2.10	2.11	2.12
Seixo com 10% de Borracha	Altura média (mm)	65,7	64,8	65,6
	Massa provete seco (g)	1203,70	1204,60	1201,80
	Massa Provete imerso (g)	688,80	690,80	683,90
	Baridade (g/cm ³)	2,338	2,344	2,321
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,432	2,432	2,432
	Força de Rotura (kN)	14,586	15,187	16,019
	Deformação (mm)	5,87	5,90	4,86

Tabela 31 - Características da formulação com 20% de borracha (48h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		3.8	3.10	3.11
Seixo com 20% de Borracha	Altura média (mm)	66,3	66,5	66,4
	Massa provete seco (g)	1208,10	1207,60	1208,00
	Massa Provete imerso (g)	685,90	680,40	681,90
	Baridade (g/cm ³)	2,313	2,291	2,296
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,414	2,414	2,414
	Força de Rotura (kN)	15,603	14,470	13,754
	Deformação (mm)	6,17	5,55	5,46

Os resultados dos provetes das formulações de seixo imersos em água durante 72 horas são apresentados da Tabela 32 à Tabela 34.

Tabela 32 - Características da formulação sem borracha (72h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		1.7	1.9	1.10
Seixo com 0% de Borracha	Altura média (mm)	60,1	64,3	64,3
	Massa provete seco (g)	1143,30	1195,30	1197,20
	Massa Provete imerso (g)	661,80	687,80	689,10
	Baridade (g/cm ³)	2,374	2,355	2,356
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,451	2,451	2,451
	Força de Rotura (kN)	15,765	15,488	14,725
	Deformação (mm)	4,41	4,56	4,99

Tabela 33 - Características da formulação com 10% de borracha (72h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		2.7	2.8	2.9
Seixo com 10% de Borracha	Altura média (mm)	65,4	65,3	65,0
	Massa provete seco (g)	1195,30	1203,70	1202,20
	Massa Provete imerso (g)	683,60	688,60	686,20
	Baridade (g/cm ³)	2,336	2,337	2,330
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,432	2,432	2,432
	Força de Rotura (kN)	12,113	14,632	14,332
	Deformação (mm)	4,80	5,46	5,28

Tabela 34 - Características da formulação com 20% de borracha (72h)

Identificação da mistura	Característica	Identificação dos provetes		
		3.7	3.9	3.12
Seixo com 20% de Borracha	Altura média (mm)	66,1	66,4	66,5
	Massa provete seco (g)	1205,30	1204,60	1211,10
	Massa Provete imerso (g)	686,90	681,60	682,00
	Baridade (g/cm ³)	2,325	2,303	2,289
	Baridade máxima teórica (g/cm ³)	2,414	2,414	2,414
	Força de Rotura (kN)	12,795	12,367	13,222
	Deformação (mm)	5,17	4,44	5,24

Para o cálculo do Índice de Resistência Conservada, foi necessário analisar os resultados dos dois grupos das diferentes formulações, em que o primeiro grupo esteve 30 minutos em banho-maria e o segundo grupo esteve 24 horas em banho-maria antes de ser ensaiado à compressão Marshall.

Com os valores médios da força de rotura, foram calculadas as resistências conservadas para as diferentes misturas.

Tabela 35 - Resultados de resistência conservada para as formulações de seixo

Identificação da mistura		Ensaio		
Agregado	% de borracha	Característica	Provetes imersos 30min a 60°C	Provetes imersos 24h a 60°C
Seixo	0%	Força de rotura Marshall média (kN)	16,91	16,32
		Resistência conservada Marshall (%)	96,5	
	10%	Força de rotura Marshall média (kN)	13,29	13,79
		Resistência conservada Marshall (%)	103,8	
	20%	Força de rotura Marshall média (kN)	12,26	13,04
		Resistência conservada Marshall (%)	106,4	

Nas próximas figuras, serão apresentados os gráficos com os resultados obtidos nos ensaios de resistência conservada.

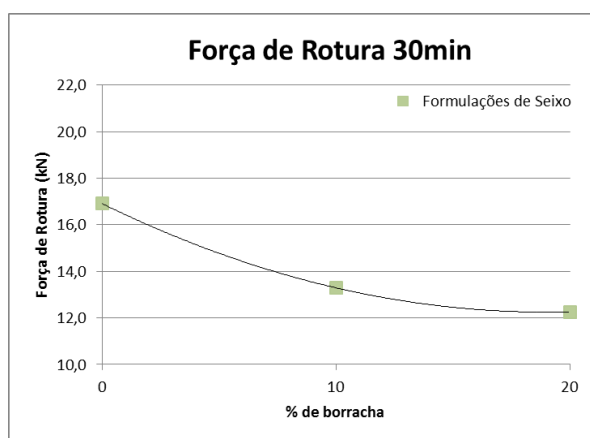


Figura 34 - Força de Rotura das formulações em 30 min de banho-maria

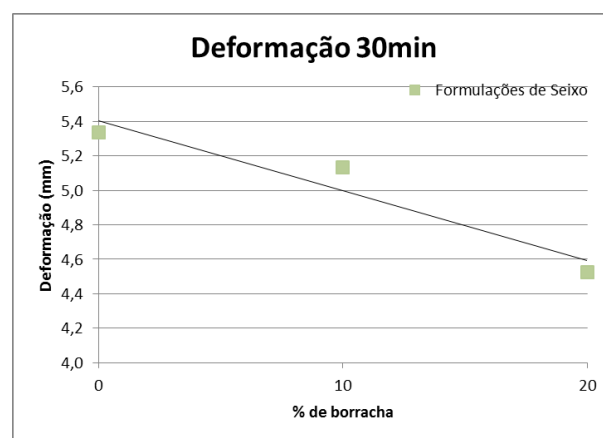


Figura 35 - Deformação das formulações em 30 min de banho-maria

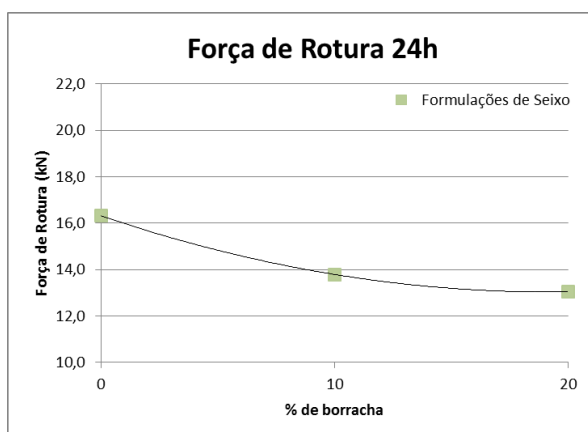


Figura 36 - Força de Rotura das formulações em 24h de banho-maria

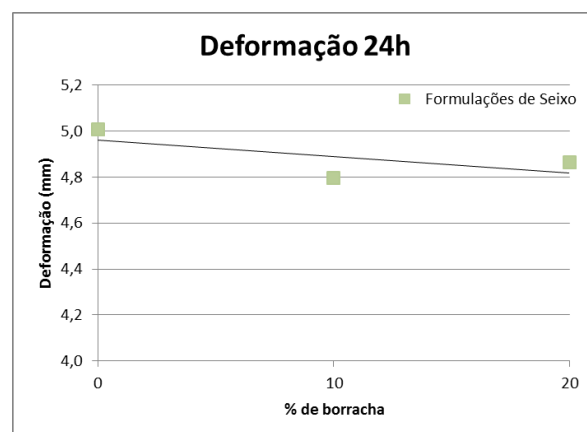


Figura 37 - Deformação das formulações em 24h de banho-maria

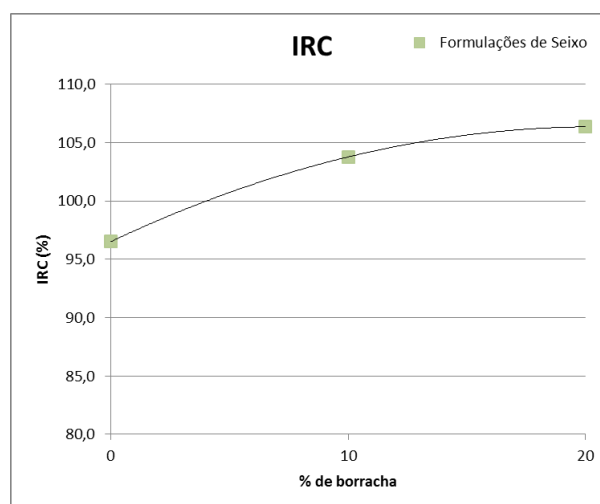


Figura 38 - Índice de Resistência Conservada das formulações

Como se pode verificar nas figuras apresentadas, existe uma anomalia na resistência conservada das formulações com borracha, já que estas aumentam a resistência com o tempo em que estão imersos em banho-maria. Após a repetição dos ensaios, e alguma reflexão, chegou-se à conclusão que este efeito poderá estar associado ao tempo de digestão da borracha. Como a borracha foi introduzida nas formulações aquando da mistura do betume, esta não teve tempo de ser digerida pelo mesmo, podendo o facto de os provetes estarem sujeitos a uma temperatura de 60°C durante 24 horas contribuir para a ocorrência de algum efeito de digestão da borracha pelo betume. Considerando os resultados obtidos e uma vez que a resistência conservada dos provetes melhora com o aumento da percentagem de borracha dos mesmos, fica implícito que, se tivesse sido considerado o tempo de digestão da

borracha, o comportamento da mistura betuminosa com a presença de borracha seria melhorado.

Por outro lado, a força de rotura dos provetes com borracha é sempre inferior à força de rotura dos provetes sem borracha. Este facto poderá estar, também, relacionado com a não consideração do tempo de digestão da borracha.

Para fundamentar melhor estas conclusões, e para que se perceba esta tendência, foram feitos mais dois grupos de provetes. Num deles, os provetes foram sujeitos à ação da água a 60°C durante 48 horas, e noutro foram sujeitos à mesma ação durante 72 horas.

Realizados os ensaios, obteve-se o gráfico de tendência da força de rotura dos provetes ao longo do tempo em que os provetes estiveram imersos em água. Na Tabela 36, apresentam-se as médias dos provetes que estiveram 48h e 72h em banho-maria.

Tabela 36 - Médias das forças de rotura dos provetes de 48h e 72h em banho-maria

Identificação da mistura		Ensaio		
Agregado	% de borracha	Característica	Provetes imersos 48h a 60°C	Provetes imersos 72h a 60°C
Seixo	0%	Força de rotura Marshall média (kN)	16,04	15,33
	10%	Força de rotura Marshall média (kN)	15,26	13,69
	20%	Força de rotura Marshall média (kN)	14,61	12,80

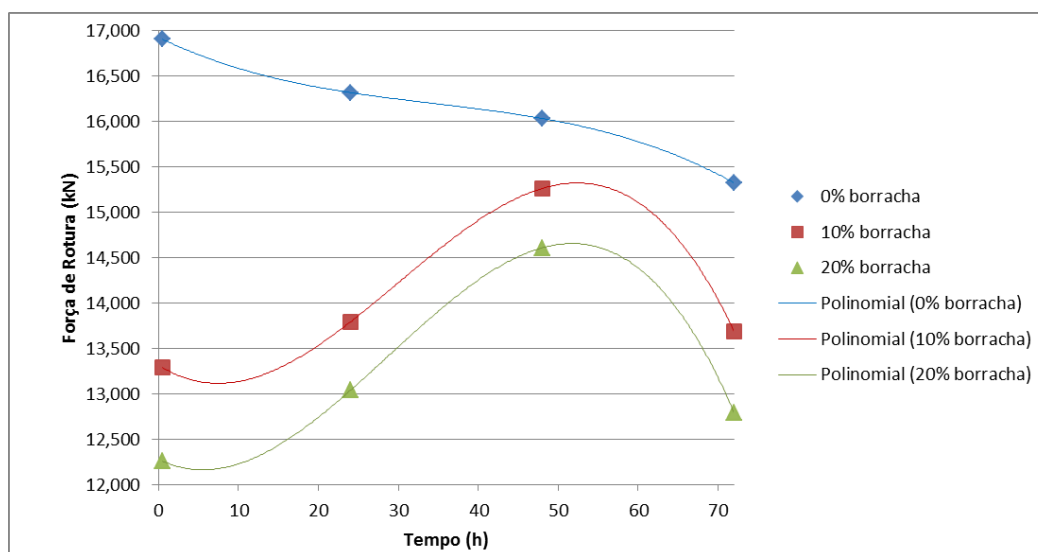


Figura 39 - Gráfico Força de Rotura ao longo do tempo de desgaste pela ação da água a 60°C

Como se pode verificar na Figura 39, a tendência do aumento de resistência, provocada pela ação da água, mantém-se. No entanto, há uma redução de resistência, que surge a partir das 50 horas de imersão em água a 60°C.

A ação da borracha, segundo o gráfico, não apresenta bons resultados, em termos de resistência, perante o agregado utilizado (seixo). A borracha não demonstra ser um bom aditivo para melhorar o comportamento da mistura. Pelo contrário, diminui a resistência da mesma. Isto pode, também, ser explicado pelo tempo de reação da borracha com o betume. Como a borracha não teve tempo de interagir com o betume, esta pode apresentar-se, em grande parte, na mistura como um agregado e não como um ligante melhorado. Desta forma, quando os provetes se encontram sujeitos à ação da água, embora a uma temperatura bastante inferior para a digestão da borracha, a mesma borracha vai, de algum modo, interagir com o betume, melhorando o comportamento da mistura.

Se observarmos a tendência de aumento de resistência dos provetes com a borracha relativamente à linha de tendência dos provetes sem borracha, podemos ver que com adição de borracha não chegam a ter uma resistência superior aos sem borracha.

Caso os tempos de digestão da borracha fossem cumpridos, provavelmente, haveria uma melhoria do comportamento da mistura betuminosa com o uso da mesma. De acordo com estes resultados, sem a consideração do tempo de digestão, não se comprova esta melhoria, podendo, assim, ser feito, futuramente, um estudo mais aprofundado que considere o tempo de digestão e possa ajudar a inferir acerca da melhoria do comportamento das misturas betuminosas (nesta propriedade) com presença de borracha por via seca.

4.2. Resultados e análise dos ensaios de Adesividade betume-agregado

Para o ensaio de adesividade betume-agregado, foram analisadas nove composições, ou seja, foram preparados nove provetes representativos dos agregados em estudo.

Neste capítulo, são apresentados os registos fotográficos das frações de cada amostra após 24 horas submersas em água destilada à temperatura ambiente e das frações que estiveram mais 3 horas submersas em água destilada a 60°C. Os registos fotográficos apresentam-se agrupados por agregado, pela seguinte ordem: brita granítica 6/12; seixo 4/11; seixo 11/16. Em cada grupo, mostram-se as imagens referentes às composições com as percentagens de borracha, em massa e em relação ao teor de betume, de 0%, 10% e 20%.

Ao apresentar cada uma dessas composições, em primeiro lugar, são apresentadas as fotos da composição após 24 horas em água destilada e depois as fotos da mesma composição

que esteve mais 3 horas em água destilada a 60°C. Em cada figura aparecem duas imagens. A imagem do lado esquerdo contém uma escala, para que se possa ter noção do tamanho do agregado presente na imagem, e contém um retângulo, que aparece ampliado à direita desta mesma foto. A apresentação da sequência das figuras começa na próxima página.

As figuras que se seguem são referentes à brita granítica 6/12, que se utilizou para verificar as diferenças relativamente às frações de seixo usadas nas formulações de estudo.

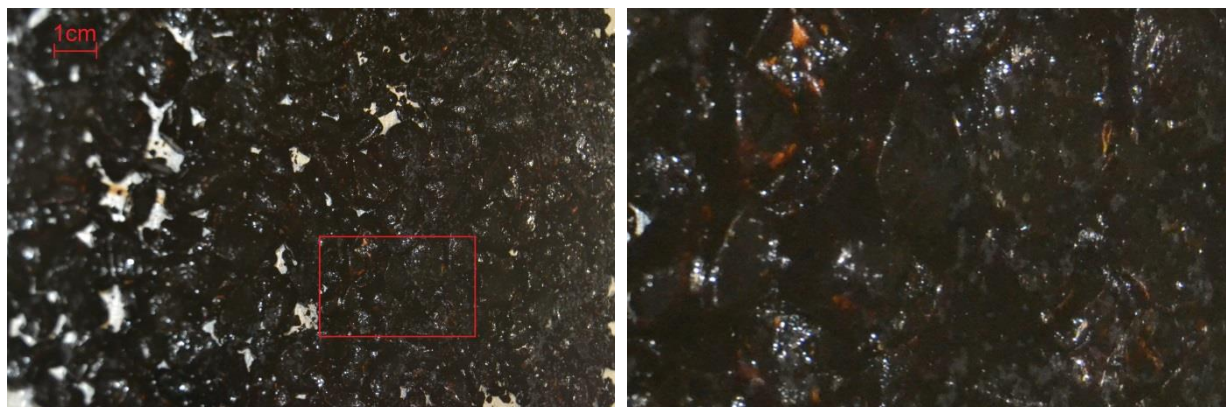


Figura 40 - Brita Granítica após 24h em água destilada (foto do autor)

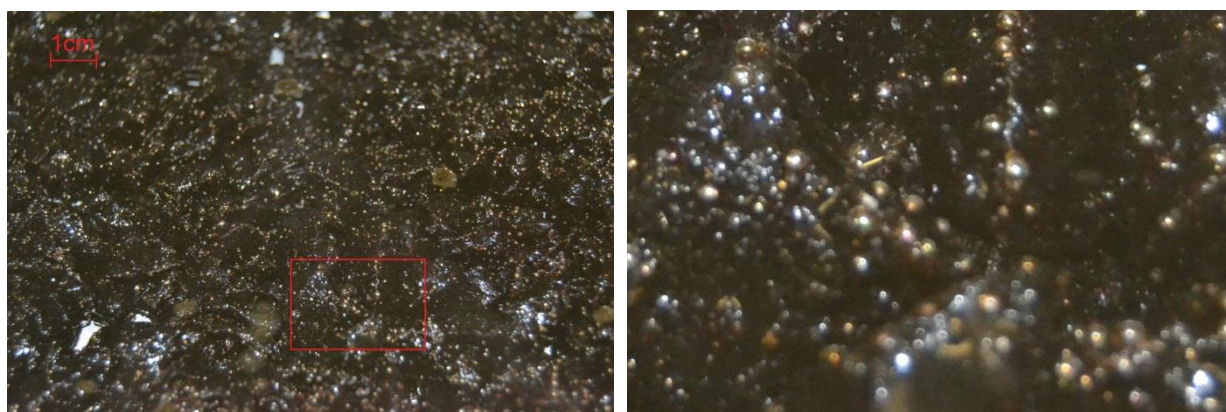


Figura 41 - Brita Granítica após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

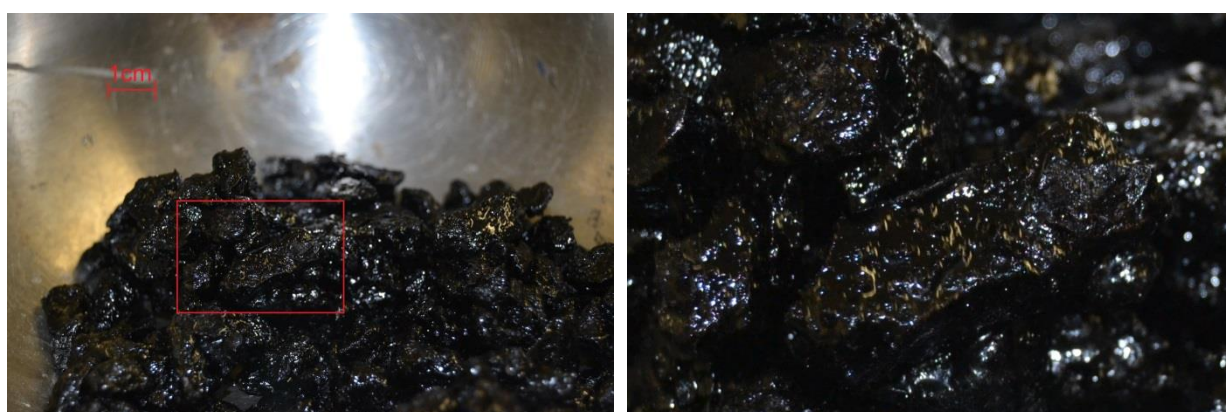


Figura 42 - Brita Granítica com 10% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)

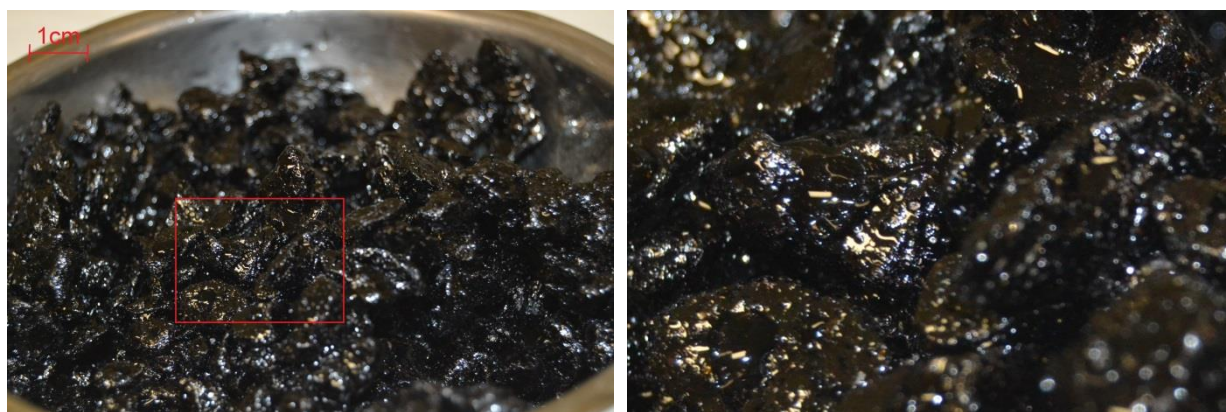


Figura 43 - Brita Granítica com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

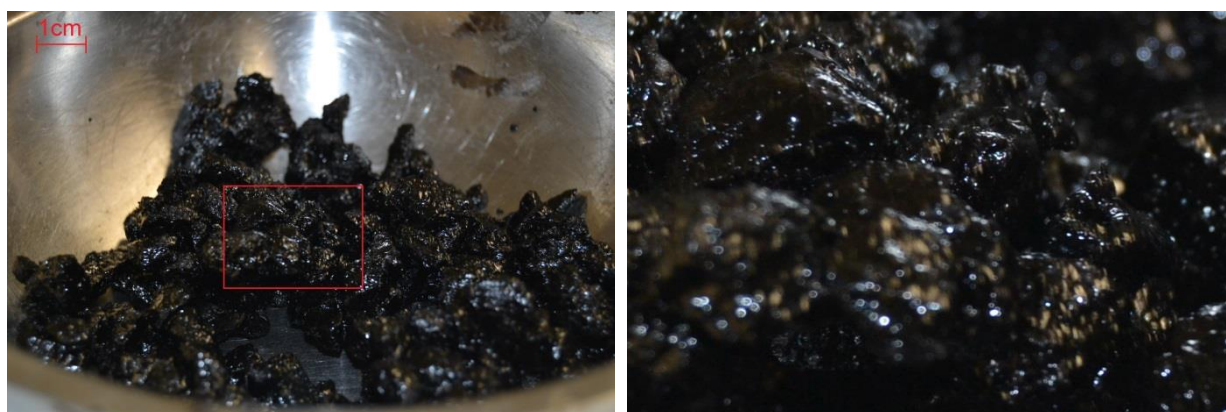


Figura 44 - Brita Granítica com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)

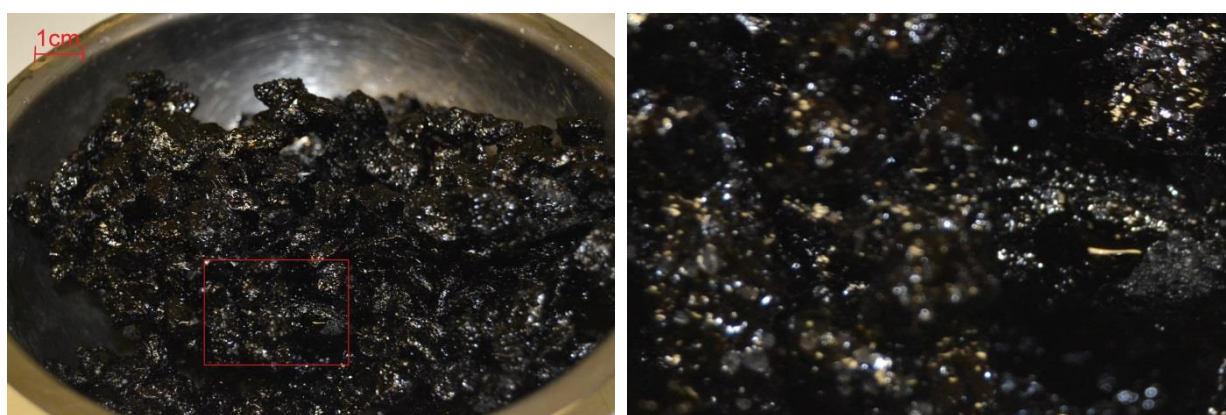


Figura 45 - Brita Granítica com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

As figuras que se seguem são referentes ao seixo 4/11 usado nas formulações de estudo.



Figura 46 - Seixo 4/11 após 24h em água destilada (foto do autor)



Figura 47 - Seixo 4/11 após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)



Figura 48 - Seixo 4/11 com 10% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)



Figura 49 - Seixo 4/11 com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

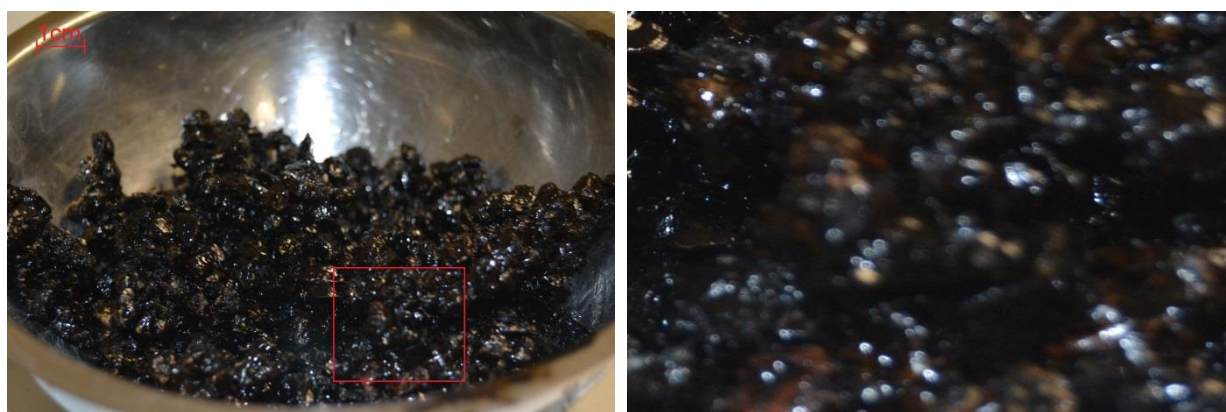


Figura 50 - Seixo 4/11 com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)

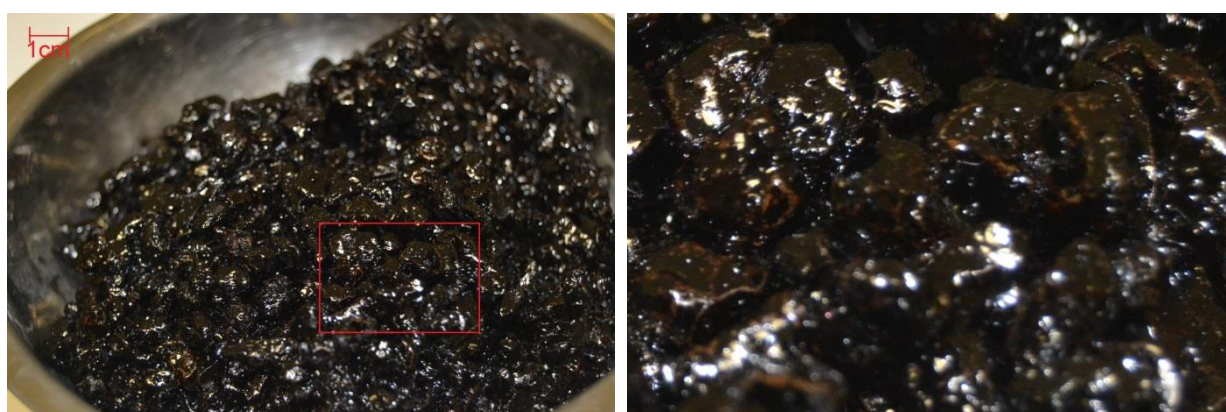


Figura 51 - Seixo 4/11 com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

As figuras que se seguem são referentes ao seixo 11/16 usado nas formulações de estudo.

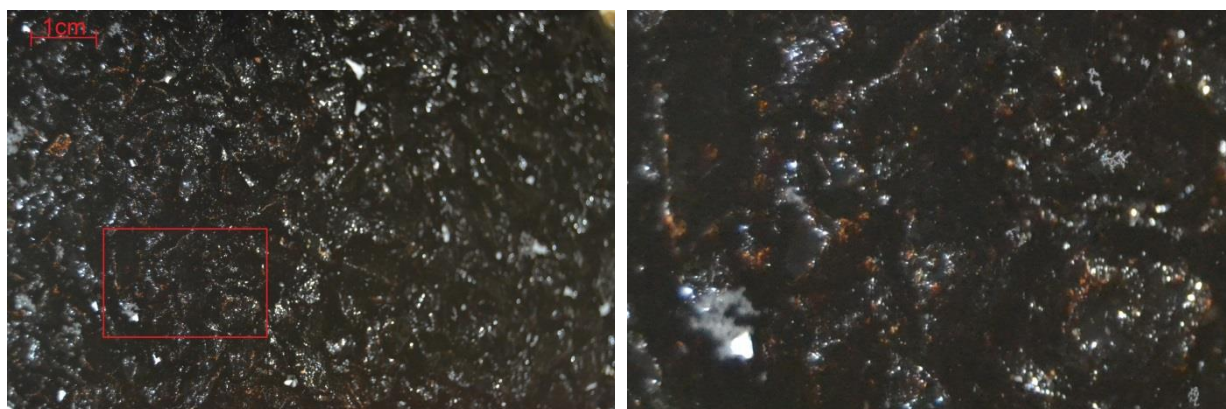


Figura 52 - Seixo 11/16 após 24h em água destilada (foto do autor)

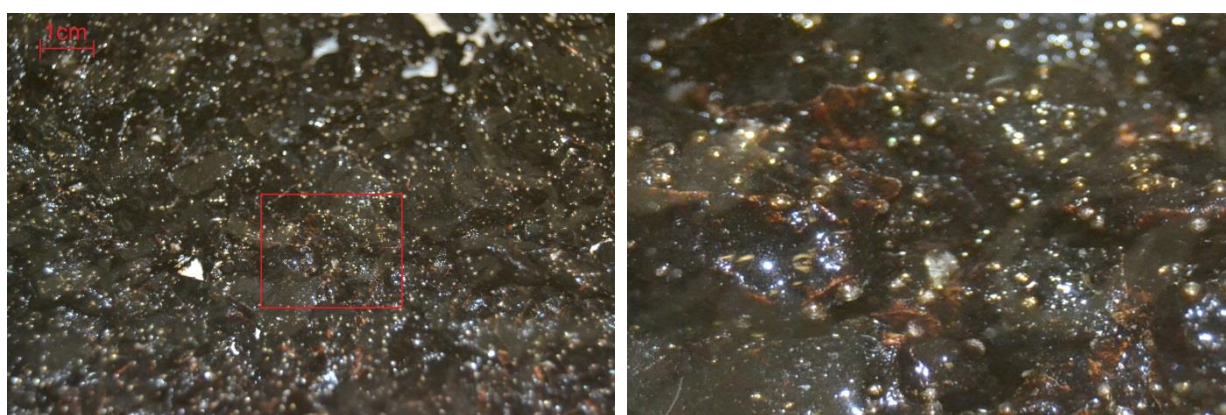


Figura 53 - Seixo 11/16 após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

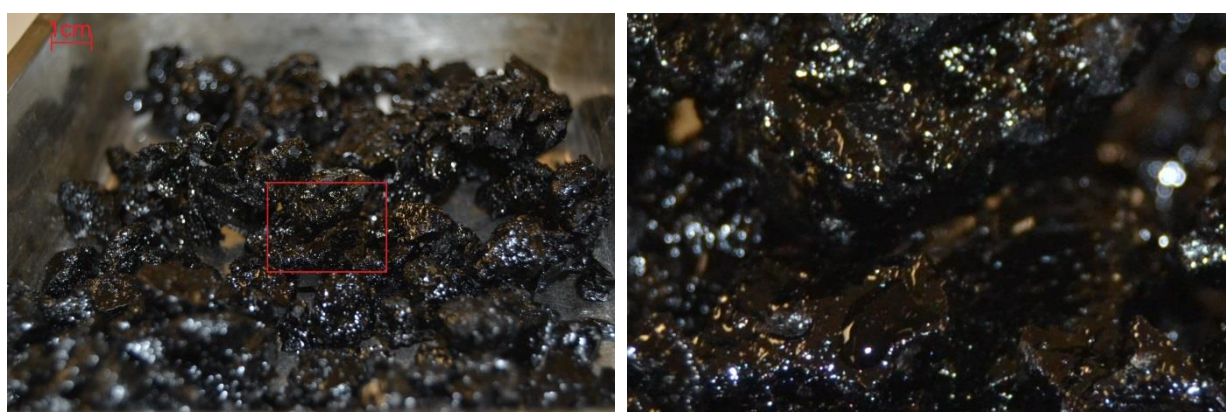


Figura 54 - Seixo 11/16 com 10% de borracha após 24 em água destilada (foto do autor)

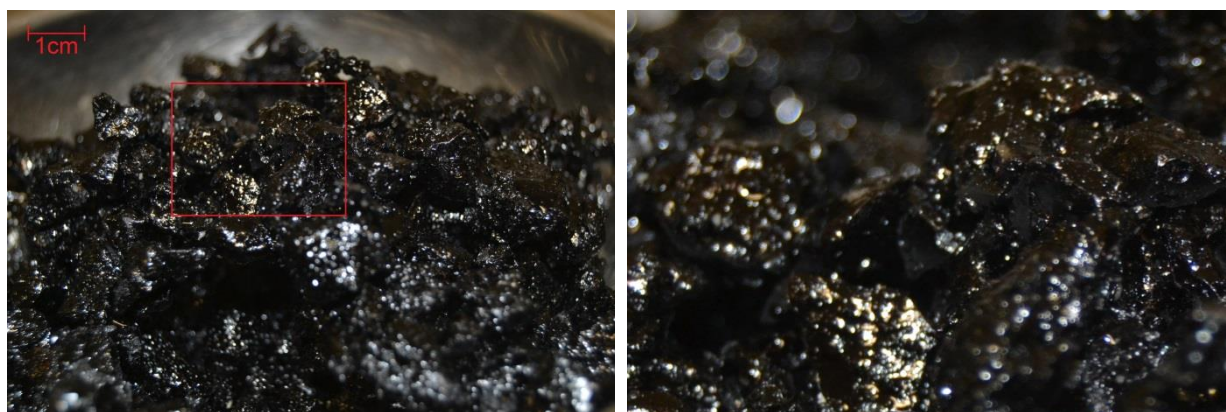


Figura 55 - Seixo 11/16 com 10% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

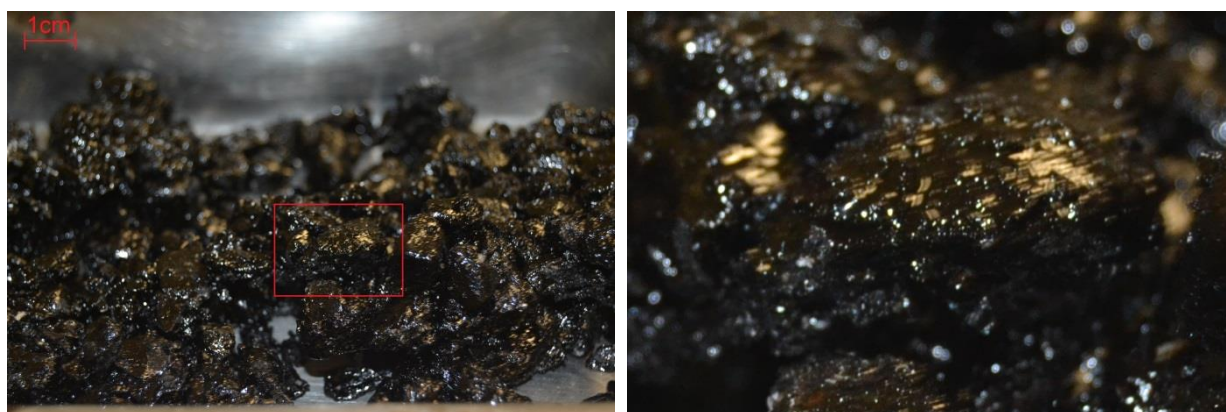


Figura 56 - Seixo 11/16 com 20% de borracha após 24h em água destilada (foto do autor)

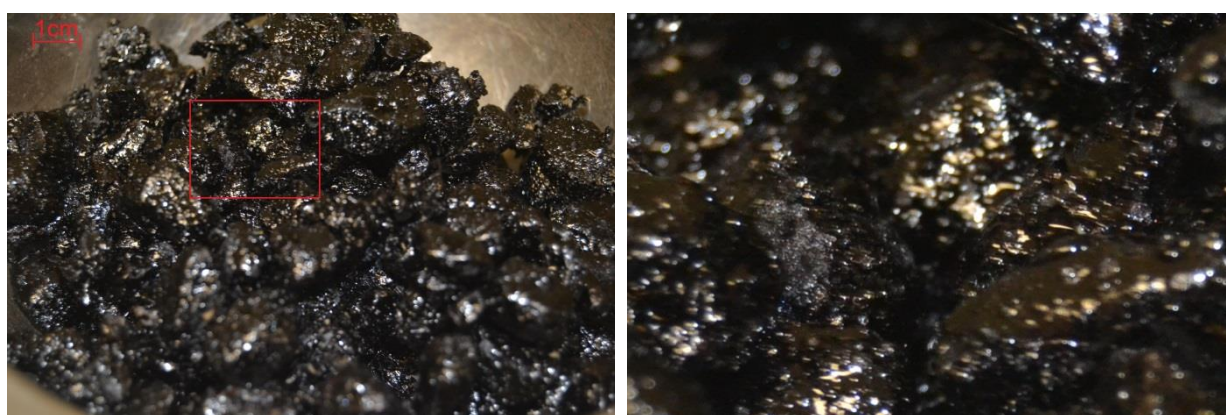


Figura 57 - Seixo 11/16 com 20% de borracha após mais 3h em água destilada a 60°C (foto do autor)

Com estas imagens, é possível analisar quais foram as melhorias com a adição de borracha nas composições e quais são os agregados que sofrem mais a ação negativa da água.

O ensaio da adesividade betume-agregado foi realizado com o intuito de averiguar as possíveis melhorias que a borracha traria à mistura nos dois agregados usados nas formulações. Para que se pudesse verificar melhor o comportamento do betume nos agregados de baixa adesividade, estes foram comparados com um agregado com melhor adesividade, tendo recaído essa escolha para uma brita granítica.

Normalmente neste ensaio é feita uma estimativa da percentagem da superfície não revestida por betume após as 24 horas coberta por água destilada e da percentagem da superfície não revestida por betume da fração de provete que fica mais 3 horas coberto em água destilada a 60°C. Como é um ensaio visual, existe uma certa ambiguidade na avaliação dessas percentagens. Por isso, optou-se por fazer uma análise caso a caso, comparando-os sem envolver valores, que poderiam induzir em erro o leitor.

No registo fotográfico apresentado, verifica-se que o agregado que teve pior comportamento de adesividade foi o Seixo 4/11, o agregado mais fino. Isto deve-se ao facto de este agregado apresentar uma forma arredondada, pois trata-se de um seixo rolado, dificultando assim, a adesividade do betume ao agregado. Logo após a mistura, constatou-se que o agregado tinha dificuldades em ficar completamente coberto de betume, tornando-se visíveis as faces do agregado.

O seixo 4/11, após as 24 horas em água destilada, ostenta praticamente 0% de superfície não revestida por betume. Mas a fração que esteve mais 3 horas a 60°C, na realidade, ficou com um aspeto um pouco mais claro, ou seja, teve perdas de betume, denotando-se mesmo que a superfície da água apresentava óleos oriundos do betume a flutuar.

Quanto ao seixo 11/16 e a brita granítica, houve comportamentos semelhantes entre eles. Não registaram grandes repulsões de betume relativamente ao seixo 4/11, ficando os agregados praticamente envolvidos em betume. O facto de o seixo 11/16 não ter grandes alterações, deve-se, essencialmente, à diferença na forma relativamente ao seixo de granulometria menor. Este apresenta uma forma mais rugosa, pois, trata-se de um seixo britado; logo, compreende-se que este tenha uma adesividade próxima da brita granítica. De referir, também, que estes dois agregados, após as 3 horas em água destilada a 60°C, apresentavam bolhas à sua volta, deformando o betume e tornando-o mais mole. Nestes, também houve óleos oriundos do betume à superfície da água.

Relativamente às composições com 10% e 20% de borracha, existiram significativas melhorias de adesividade. No seixo 4/11, onde houve piores resultados nas composições sem borracha, esta melhoria foi mais evidente. Logo à partida, o seixo ficou completamente envolvido, não se verificando a claridade do agregado, como pode ser apreciado no registo

fotográfico. Registou-se uma maior consistência do betume envolvente ao agregado e não houve, praticamente, perdas de betume, tanto nas 24 horas como nas 3 horas a 60°C.

Na brita granítica e no seixo 11/16 registou-se novamente uma semelhança de resultados. Mas, mais uma vez, apareceram bolhas em redor dos agregados, não sendo estas tão visíveis como foi verificado nas composições sem borracha.

Em todas as composições com borracha, depois das 3 horas a 60°C, apareceram, novamente, óleos oriundos do betume. Apesar desse efeito, houve melhorias na adesividade dos agregados com a adição de borracha.

Em jeito de conclusão, pode-se afirmar que o seixo rolado teve maiores problemas de adesividade. Por outro lado, teve grandes melhorias com a introdução da borracha. Essas melhorias são maiores quanto maior for a percentagem de borracha introduzida.

O seixo 11/16 e a brita granítica também demonstraram melhores envolvimentos de betume com a borracha. Apesar de as imagens apresentadas não serem muito esclarecedoras, a introdução da borracha deu um melhor envolvimento do betume ao agregado, tornando-o mais consistente.

Denotou-se outro aspeto interessante ao misturar o betume nos agregados. Quando foi introduzida a borracha, houve uma grande dificuldade em limpar os restos de betume presos na misturadora, podendo, assim, afirmar-se a ideia de que a borracha aumenta a adesividade do betume. O motivo pelo qual ficaram presas à misturadora grandes quantidades de ligante tem a ver com a ausência de finos nas composições feitas.

Deste modo, e com base nestes resultados, conclui-se que a borracha é de facto uma mais-valia no uso de misturas betuminosas e poderá ser um bom aditivo para misturas betuminosas compostas por agregados de baixa adesividade.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo estudar misturas betuminosas com adição de borracha formuladas com agregados de baixa adesividade. Para isso, foram formuladas misturas onde foi estudado, essencialmente, as diferenças ao nível da adesividade. Para as formulações usou-se um agregado de baixa adesividade (seixo).

Para o estudo do comportamento recorreu-se a ensaios laboratoriais, nomeadamente ensaios de resistência conservada e adesividade betume-inerte.

Segundo o ensaio de resistência conservada, os resultados não foram de todo conclusivos. Houve, de facto, um retardamento no envelhecimento provocado pela água à temperatura de 60°C nas formulações com adição de borracha, comparativamente às formulações sem borracha. De tal modo, que, ao longo do tempo, as formulações de borracha aumentaram a resistência, até cerca das 50 horas. Mas a resistência máxima (força de rotura) à compressão dos provetes com borracha não superaram os provetes sem borracha. Uma possível justificação para este efeito poderá ser a forma como os provetes foram feitos, pois não se teve em conta o tempo de digestão da borracha.

O tempo de digestão da borracha é o tempo que a borracha necessita para se fundir com o betume, como foi descrito mais atrás nesta dissertação. Como a borracha não teve tempo para ser digerida, esta pode, de algum modo, ter sido digerida durante o tempo que esteve sujeito à ação da água a 60°C. Este efeito positivo pode ter entrado em confronto com o efeito negativo do envelhecimento, daí resultar um aumento de resistência até às 50 horas.

Contudo, esta justificação não pode, de todo, ser confirmada neste estudo. No futuro, deverão ser realizados estudos mais aprofundados, por forma a confirmar este efeito.

No ensaio relativo à adesividade betume-agregado, houve, no entanto, resultados mais concretos e conclusivos. Ficou comprovado que a borracha aditivada nas formulações com os diferentes agregados melhorou a adesividade. Nos diferentes agregados, foi notória essa melhoria, ficando a superfície do agregado bem envolvida em ligante bastante consistente, mesmo depois das ações da água a que estiveram sujeitas. Essa melhoria na adesividade do ligante foi tanto melhor quanto maior foi a adição de borracha.

Também foi conclusivo que o seixo rolado tem piores comportamentos ao nível da adesividade, comparado com o seixo britado. Esta diferença está associada à forma dos agregados: o seixo rolado tem uma superfície mais lisa que o britado, logo, o betume vai ter maiores dificuldades em “colar-se” ao agregado. O seixo britado teve um comportamento

semelhante à brita granítica usada para comparação. Isto, também, é justificado pela forma britada que o agregado tem.

Em suma, reforça-se a ideia de que a borracha melhora o comportamento das misturas betuminosas; contudo, nas misturas formuladas com seixo, esta melhoria não foi conclusiva. Mas, olhando para os resultados da adesividade, o comportamento ao nível da adesividade é significativamente melhor com o uso da borracha, sendo mais evidente no seixo 4/11.

Para concluir se na realidade a borracha seria um bom aditivo em formulações com seixo, devem ser feitos novos estudos cumprindo os tempos de digestão da borracha. Estes estudos estão apresentados já no subcapítulo seguinte.

5.1. Estudos futuros

Durante a fase de execução e conclusão desta dissertação, foram várias as dúvidas relativas às conclusões, baseadas nos resultados obtidos. Tendo em conta essas dúvidas, propõe-se neste subcapítulo vários estudos que poderão ser efetuados no futuro.

Como já foi dito anteriormente, não foi possível concluir se a borracha de facto é um bom aditivo para melhorar o comportamento de misturas betuminosas formuladas com seixo. Supondo que este facto se deve aos tempos de digestão da borracha no betume, propõe-se que, no futuro, seja realizado o mesmo estudo com variações nos tempos de digestão. Neste estudo pode também ser investigado qual o melhor tempo necessário para a digestão das misturas de estudo.

Outro estudo recomendado passa por comparar o comportamento de misturas betuminosas com adição de borracha formuladas com diferentes tipos de agregados, podendo, assim, serem conhecidos os agregados que terão melhor comportamento com a borracha e quais não devem ser usados.

Por fim, como existe cada vez mais um maior controlo nos gastos financeiros, e se se concluir que a borracha é um bom aditivo em misturas betuminosas formuladas com agregados de baixa adesividade, pode ser feito um estudo económico do uso de borrachas em misturas betuminosas deste tipo. Ou seja, perceber se é economicamente viável a substituição de aditivos químicos e orgânicos pela borracha reciclada.

6. REFERÊNCIAS

- Amaral, S. d. C. (2000). *Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)*. Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Antunes, I., Giuliani, F., & Sousa, J. B. (2004). *Caraterização reológica de betumes modificados CRM sujeitos a envelhecimento artificial*. Paper presented at the 3º Congresso Rodoviário Português Lisboa.
- Antunes, M., Eusébio, M. I., Costa, M. S. d., Domingos, P., & Lima, H. (2002). *Caracterização da mistura betuminosa com betume modificado com borracha aplicada no IC1*. Paper presented at the 2º Congresso Rodoviário Português Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Araújo, C. M. d. C. (2009). Queimada ilegal de pneus. olhares.sapo.pt.
- Batista, F. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio*. Doutoramento, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Batista, F., Antunes, M. d. L., & Fonseca, P. (2008). *Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha*. Paper presented at the 5º Congresso Rodoviário Português.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. d., Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros* Rio de Janeiro.
- Burtynsky, E. (1999). Oxford Tire Pile #8. <http://www.edwardburtynsky.com/>.
- CEI-interprises. (2012a). Asphalt-rubber mixing unit with optional air-conditioned control cabin. <http://www.ceienterprises.com>.
- CEI-interprises. (2012b). King portable asphalt plant. <http://www.ceienterprises.com>.
- CEN. (2003). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. *Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. (Vol. EN 12697-12): Comité Européen de Normalisation.
- EP. (2012). Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - *Pavimentação. Características dos materiais*. Estradas de Portugal, S. A.
- Fontes, L. P. T. d. L. (2009). *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos* Doutoramento, Universidade do Minho e Universidade Federal de Santa Catarina.
- Fontes, L. P. T. d. L., Triches, G., Pereira, P. A. A., & Pais, J. C. (2007). *Comparação do desempenho de asfaltos produzidos através dos sistemas continuos blend e terminal blend*. Paper presented at the 38º Reunião Anual de Pavimentação e 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária Manaus, AM - Brasil.
- Heitzman, M. (1992). Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier Federal Highway Administration.
- Hicks, R. G., & Epps, J. A. (2000). Quality Control For Asphalt Rubber Binders And Mixes. Temp, Arizona, USA: Rubber Pavements Association.
- Holleran, G., & Reed, J. R. (2000). *Emulsification of Asphalt Rubber Blends*. Paper presented at the Asphalt Rubber, Vilamoura, Portugal.
- Indriunas, L. (2008). HowStuffWorks - Como funciona o reaproveitamento ou reciclagem de pneus Retrieved 10 de Novembro de 2012
- InIR. (2009a). Ensaios de Comparação Interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de Misturas Betuminosas compactadas. In LNEC (Ed.). InIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, I.P. .

- InIR. (2009b). Levantamento das Características dos Agregados produzidos em Portugal. In F. d. C. e. T. d. U. d. Coimbra (Ed.). InIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, I.P. .
- InIR. (2010). Construção e Reabilitação de Pavimentos - Agregados. In L. Publicações e Projectos de Engenharia (Ed.). InIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, I.P. .
- IPQ. (1999). Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados *Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas* (Vol. NP EN 933-2). Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2000). Ensaio das Propriedades geométricas dos agregados *Análise granulométrica. Método de peneiração* (Vol. NP EN 933-1). Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2003). Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados *Determinação da massa volúmica e da absorção de água* (Vol. NP EN 1097-6): Instituto Português da Qualidade
- IPQ. (2011a). Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação. (Vol. NP EN 12591): Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2011b). Misturas Betuminosas. Especificações dos Materiais *Parte 1: Betão Betuminoso* (Vol. NP EN 13108-1): Instituto Português da Qualidade.
- Ivson. (2007). Granulado de Borracha. <http://www.reciclanip.com.br>.
- J.A.E. (1953). Norma para a determinação da adesividade betume-inerte (Vol. J.A.E P.9-53).
- Janoo, V. C., & Korhonen, C. (1999). Performance Testing of Hot-Mix Asphalt Aggregates. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory: NEW HAMPSHIRE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.
- Kandhal, P. S. (1992). Waste Materials in Hot Mix Asphalt - An Overview. National Center for Asphalt Technology: Auburn University.
- Martins, M. A. (2001). *Fibra de Sisal: Mercerização, Acetilação e Aplicação em Compósitos de Borracha de Pneu Triturado*. Tese de Douturamento, Universidade Estadual de Campinas.
- Minhoto, M., Pais, J., & Pereira, P. (2002). *A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados* Paper presented at the 2º Congresso Rodoviário Português, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Decreto-Lei nº 43/2004 de 2 de Março (2004).
- Neto, S. A. D. (2004). *Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados*. Doutoramento, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia.
- Neto, S. A. D., Farias, M. M., Pais, J. C., & Pereira, P. A. A. (2006). *Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties* Paper presented at the Asphalt Rubber 2006, Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.
- Oda, S., & Júnior, J. L. F. (2001). Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso de obras de pavimentação (Vol. 23, pp. 1589-1599). Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil
- Payán, T. F. J. (2004). *Empleo de Polvo de Caucho Procedente de Neumáticos Fuera de Uso (PNFU) en Mezclas Bituminosas*. Paper presented at the IX Jornadas de conservación de carreteras, Salamanca.
- Pereira, F. (2009). *Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas*. Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Pereira, P., Pais, J. C., Trichês, G., & Fontes, L. P. T. L. (2007, 8-10 August, 2007). *Rehabilitation alternatives using new asphalt rubber mixtures with Brazilian materials*. Paper presented at the Fifth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Park City, Utah, USA

- Ribeiro, R. M. d. P. (2012). *Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários*. Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu. , Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.
- Rodrigues, R. M. d. S. (2012). *Análise da Aplicação do Betume Modificado com Borracha em Portugal*. Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- Specht, L. P. (2004). *Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus*. Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Takallou, H. B., & Hicks, R. G. (1988). Development of Improved Mix and Construction Guidelines For Rubber-Modified Asphalt Pavements. Transportation Research Board.
- Decreto-Lei nº 111/2001 de 6 de abril (2001).
- Valorpneu. (2012). Relatório Anual de Contas. valorpneu.pt.
- Vicente, A. M. M. (2006). *A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis* Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I (Análises Granulométricas)

Análise Granulométrica

Norma de ensaio:

-NP EN 933-1:2000

Laboratório:

-DEC-UA

Identificação da amostra:

-Pó de Pedra

Data:

-Março de 2013

Procedimento usado:

-Lavagem e peneiração

Lavagem no peneiro 63 µm

Massa seca total, M_1 500,00g

Massa seca após lavagem, M_2 456,80g

Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$ 43,20g

Peneiração a seco

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
2" ½	63,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1" ¼	31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8"	16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16"	8,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	4,0	33,43	6,69	6,69	93,31
10	2,0	138,00	27,60	34,29	65,71
18	1,0	101,61	20,32	54,61	45,39
35	0,500	67,45	13,49	68,10	31,90
60	0,250	51,22	10,24	78,34	21,66
120	0,125	35,25	7,05	85,39	14,61
230	0,063	25,94	5,19	90,58	9,42
-	Fundo, P	3,48	-	-	-

Soma de controlo, SC 456,38
Percentagem de finos que passa no peneiro 63 µm:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad 9,34\%$$

Validação dos resultados:

$$\frac{M_2 - SC}{M_2} \times 100 \quad 0,09 < 1\% \text{ OK}$$

Análise Granulométrica

Norma de ensaio:

-NP EN 933-1:2000

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 4/11

Data:

-Março de 2013

Procedimento usado:

-Lavagem e peneiração

Lavagem no peneiro 63 µm

Massa seca total, M_1 2000,00g

Massa seca após lavagem, M_2 1994,75g

Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$ 5,25g

Peneiração a seco

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
2" ½	63,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1" ¼	31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8"	16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16"	8,0	55,46	2,77	2,77	97,23
5	4,0	1779,50	88,98	91,75	8,25
10	2,0	146,44	7,32	99,07	0,93
18	1,0	9,58	0,48	99,55	0,45
35	0,500	1,44	0,07	99,62	0,38
60	0,250	0,64	0,03	99,65	0,35
120	0,125	0,58	0,03	99,68	0,32
230	0,063	0,68	0,03	99,72	0,28
-	Fundo, P	0,18	-	-	-

Soma de controlo, SC 1994,50
Percentagem de finos que passa no peneiro 63 µm:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad 0,27\%$$

Validação dos resultados:

$$\frac{M_2 - SC}{M_2} \times 100 \quad 0,27 < 1\% \text{ OK}$$

Análise Granulométrica

Norma de ensaio:

-NP EN 933-1:2000

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 11/16

Data:

-Março de 2013

Procedimento usado:

-Lavagem e peneiração

Lavagem no peneiro 63 µm

Massa seca total, M_1 2000,00g

Massa seca após lavagem, M_2 1994,62g

Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$ 5,38g

Peneiração a seco

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
2" ½	63,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1" ¼	31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8"	16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16"	8,0	1355,53	67,78	67,78	32,22
5	4,0	394,39	19,72	87,50	12,50
10	2,0	96,01	4,80	92,30	7,70
18	1,0	44,50	2,23	94,52	5,48
35	0,500	24,42	1,22	95,74	4,26
60	0,250	19,13	0,96	96,70	3,30
120	0,125	18,25	0,91	97,61	2,39
230	0,063	16,63	0,83	98,44	1,56
-	Fundo, P	11,65	-	-	-

Soma de controlo, SC 1980,51
Percentagem de finos que passa no peneiro 63 µm:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad 0,85\%$$

Validação dos resultados:

$$\frac{M_2 - SC}{M_2} \times 100 \quad 0,97 < 1\% \text{ OK}$$

Análise Granulométrica

Norma de ensaio:

-NP EN 933-1:2000

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Filler

Data:

-Março de 2013

Procedimento usado:

-Lavagem e peneiração

Lavagem no peneiro 63 µm

Massa seca total, M_1 10,01g

Massa seca após lavagem, M_2 -

Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$ -

Peneiração a seco

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
2" ½	63,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1" ¼	31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8"	16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16"	8,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5	4,0	0,00	0,00	0,00	100,00
10	2,0	0,00	0,00	0,00	100,00
18	1,0	0,00	0,00	0,00	100,00
35	0,500	0,00	0,00	0,00	100,00
60	0,250	0,00	0,00	0,00	100,00
120	0,125	0,00	0,00	0,00	100,00
230	0,063	0,92	9,19	9,19	90,81
-	Fundo, P	8,71	-	-	-
Soma de controlo, SC		9,63			

Percentagem de finos que passa no peneiro 63 µm:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

Validação dos resultados:

$$\frac{M_2 - SC}{M_2} \times 100$$

Análise Granulométrica

Norma de ensaio:

-NP EN 933-1:2000

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Brita Granítica 6/12

Data:

-Março de 2013

Procedimento usado:

-Lavagem e peneiração

Lavagem no peneiro 63 µm

Massa seca total, M_1 2000,00g

Massa seca após lavagem, M_2 1984,41g

Massa seca dos finos removidos por lavagem, $M_1 - M_2$ 15,59g

Peneiração a seco

Peneiros	Abertura (mm)	Material retido (g)	Percentagem de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material retido (%)	Percentagem cumulativa de material passado (%)
2" ½	63,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1" ¼	31,5	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8"	16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16"	8,0	1239,86	61,99	61,99	38,01
5	4,0	691,31	34,57	96,56	3,44
10	2,0	19,65	0,98	97,54	2,46
18	1,0	6,59	0,33	97,87	2,13
35	0,500	5,15	0,26	98,13	1,87
60	0,250	5,75	0,29	98,42	1,58
120	0,125	6,68	0,33	98,75	1,25
230	0,063	6,92	0,35	99,10	0,90
-	Fundo, P	2,39	-	-	-

Soma de controlo, SC 1984,30
Percentagem de finos que passa no peneiro 63 µm:

$$\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad 0,90\%$$

Validação dos resultados:

$$\frac{M_2 - SC}{M_2} \times 100 \quad 0,01 < 1\% \text{ OK}$$

7.2.ANEXO II (Massas Volúmicas e Absorção de Água)

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Pó de Pedra

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do Picnómetro

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa do Picnómetro contendo o provete de agregado saturado, M_2	1134,01g
--	----------

Massa do Picnómetro apenas cheio de água, M_3	887,26g
---	---------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	396,28g
---	---------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	395,84g
--	---------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,65 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,64 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,64 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,64 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 0,11\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 4/11 > 4mm

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do cesto de rede metálica

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa aparente do cesto contendo o provete de agregado saturado, M_2	1356,8g
--	---------

Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M_3	127,7g
---	--------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	2005,9g
---	---------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	1981,0g
--	---------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,54 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,58 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,58 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 1,26\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 4/11 < 4mm

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do picnómetro

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa do Picnómetro contendo o provete de agregado saturado, M_2	1015,75g
--	----------

Massa do Picnómetro apenas cheio de água, M_3	893,05g
---	---------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	203,98g
---	---------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	203,35g
--	---------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,52 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,50 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,50 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,50 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 0,31\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 4/11 – média ponderada dos dois ensaios

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

- Método do cesto de rede metálica e picnómetro

Temperatura da água

22°C

 Massa volúmica da água, ρ_w

 0,9978 Mg/m³
Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,62 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,54 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,57 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,57 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 1,18\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo11/16 > 4mm

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do picnómetro

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa do Picnómetro contendo o provete de agregado saturado, M_2	1310,60g
--	----------

Massa do Picnómetro apenas cheio de água, M_3	127,70g
---	---------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	1927,20g
---	----------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	1906,50g
--	----------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,56 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,58 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,58 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 1,09\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Godo 4/11 < 4mm

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do picnómetro

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa do Picnómetro contendo o provete de agregado saturado, M_2	984,40g
--	---------

Massa do Picnómetro apenas cheio de água, M_3	889,82g
---	---------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	152,45g
---	---------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	152,23g
--	---------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,62 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,63 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 0,14\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC – UA

Identificação da amostra:

-Godo 11/16 – média dos dois ensaios

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do cesto de rede metálica e picnómetro

Temperatura da água

22°C

Massa volúmica da água, ρ_w

0,9978 Mg/m³
Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,56 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,59 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,59 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 0,97\%$$

Massa Volúmica

Norma de ensaio:

-NP EN 1097-6:2003

Laboratório:

-DEC - UA

Identificação da amostra:

-Brita granítica 6/12

Data:

-Abril de 2013

Procedimento usado:

-Método do cesto de rede metálica

Temperatura da água	22°C
Massa volúmica da água, ρ_w	0,9978 Mg/m ³

Massa aparente do cesto contendo o provete de agregado saturado, M_2	1247,20g
--	----------

Massa aparente do cesto vazio imerso em água, M_3	127,70g
---	---------

Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar, M_1	1805,20g
---	----------

Massa no ar do provete seco em estufa, M_4	1777,6g
--	---------

Massa Volúmica do material impermeável das partículas, ρ_a

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,70 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{rd}

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,59 \text{ Mg/m}^3$$

Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca, ρ_{ssd}

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad 2,63 \text{ Mg/m}^3$$

Verificação dos cálculos

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \quad 2,63 = \rho_{ssd} \text{ Mg/m}^3 \text{ OK}$$

Absorção de água (com percentagem da massa seca), WA_{24}

$$\rho_{rd} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad 1,55\%$$